

Institut für Pflanzenbau  
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn  
Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau  
Direktor: Prof. Dr. W. Kühbauch

**Teilflächenspezifische Unkrautkontrolle im präzisen  
Pflanzenbau unter Berücksichtigung von Ertragsdaten und  
Bodenparametern**

Inaugural-Dissertation  
zur  
Erlangung des Grades  
Doktor der Agrarwissenschaften  
(Dr. agr.)  
der  
Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät  
der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität  
zu Bonn

vorgelegt am 17. Juli 2001

von  
Dipl.-Ing. agr. Christian Timmermann  
aus Sieglar

|                             |                       |
|-----------------------------|-----------------------|
| Referent:                   | PD Dr. R. Gerhards    |
| Korreferent:                | Prof. Dr. H. Goldbach |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 24. Oktober 2001      |

## **Teilflächenspezifische Unkrautkontrolle im präzisen Pflanzenbau unter Berücksichtigung von Ertragsdaten und Bodenparametern**

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle über vier Jahre in einer Felderfolge bestehend aus Winterweizen, Wintergerste, Körnermais und Zuckerrübe durchgeführt. Die aus der praktischen Umsetzung des Verfahrens gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse lassen die Bewertung der technischen Anforderungen, der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit der präzisen Unkrautkontrolle zu.

In Abhängigkeit von der Bekämpfungsschwelle und dem kulturspezifischen Unkrautauftreten waren die Potenziale Herbizide einzusparen in den verschiedenen Kulturen unterschiedlich hoch. Im Wintergetreide lagen die durchschnittlichen Einsparungen an Gräserherbiziden bei ca. 90 %, im Mais bei 78 % und in Zuckerrüben bei 36 %. Die Einsparungen an Herbiziden gegen dikotyle Unkräuter lagen im Wintergetreide bei 60 %, im Mais bei 11 % und in Zuckerrüben bei 41 %. Die monetären Einsparungen durch den verminderten Herbizideinsatz und die Reduzierung der Herbiziddosis variierten zwischen den Kulturen in Abhängigkeit vom Herbizidpreis und dem Einsparpotenzial. Im Körnermais konnten 42 €/ha, in Winterweizen 32 €/ha, in Wintergerste 27 €/ha und in Zuckerrüben 20 €/ha eingespart werden.

Außer aus der Herbizideinsparung resultierte der ökologische Nutzen aus der Aussparung großer Teilflächen von der Herbizidapplikation über mehrere Jahre. Flora und Fauna können sich in solchen Bereichen, in denen die Unkrautdichte unter der Bekämpfungsschwelle lag, ungestört entwickeln.

Für die technische Umsetzung des Verfahrens der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle in der Praxis sind Entwicklungen im Bereich der automatischen Unkrauterkennung und bei der Applikationstechnik wie die Möglichkeiten zum Wirkstoffwechsel und Dosisregulierung während der Fahrt notwendige Voraussetzungen.

Die Entwicklung von teilschlagspezifischen Entscheidungsmodellen, die zusätzlich zur heterogenen Unkrautverteilung auch Inhomogenitäten der Bodeneigenschaften innerhalb von Ackerschlägen berücksichtigen, trägt zu einem effizienteren Herbizideinsatz bei.

Die Analyse der Gründe von schlaginternen Ertragsunterschieden wurde in der Arbeit mit dem Ziel durchgeführt, die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle in den präzisen Pflanzenbau einzuordnen und damit den Betriebsmitteleinsatz zu optimieren. Als ertragsbegrenzende Faktoren konnten Bodenunterschiede und Topografie, die einen Einfluss auf die Wasserversorgung der Kulturpflanzen hatten, sowie die Bewirtschaftungsgeschichte, die den Humus- und die Nährstoffgehalt der Böden beeinflusste, und eine hohe Unkrautdichte identifiziert werden.

Liegen natürliche Ursachen für Ertragsunterschiede vor, ist der Einsatz der Betriebsmittel an das jeweilige Ertragspotenzial anzupassen. Im einzelnen bedeutet das, dass die Saatkichte auf ertragsschwachen Teilflächen geringer zu wählen ist, die Düngung sich an den jeweiligen Nährstoffentzügen zu orientieren hat und Schadensschwellen für den Einsatz von Pestiziden an wechselnde Konkurrenzverhältnisse und zu erwartende monetäre Erträge der Teilflächen anzupassen sind.

Haben die Ertragsunterschiede Ursachen, die auf die Bewirtschaftung zurückzuführen sind, ist beim teilflächenspezifischen wirtschaften darauf hinzuwirken, die Heterogenitäten im Ertrag zu beseitigen. Hier sind langfristig geplante Maßnahmen zur Aufdüngung mit Grundnährstoffen oder zur Beseitigung von Unkrautnestern in den betroffenen Teilflächen geeignet.

## **Site-specific weed control in precision farming considering yield data and soil parameters**

In this study, site-specific weed control was conducted over four years in a rotation of winter wheat, winter barley, maize and sugar beet. The results allowed an evaluation of the economic efficiency, the environmental sustainability and the technical requirements of site-specific weed control.

The amount of herbicide savings varied between the crops, depending on the different thresholds for weed control and the weed populations associated with each crop. For grass herbicides, the savings were 90 % in winter cereals, 78 % in maize, and 36 % in sugar beet. For herbicides against broadleaf weeds, 60 % were saved in winter cereals, 11 % in maize, and 41 % in sugar beets. The monetary savings resulting from the reduction in herbicide use varied between the crops, depending on the amount of herbicides saved and the price of the herbicides. In maize, savings of 42 €/ha were realised, in winter wheat of 32 €/ha, in winter barley of 27 €/ha and in sugar beet of 20 €/ha.

Besides cost reduction, due to the reduced amount of applied herbicides, site-specific weed control resulted also in positive ecological effects. Large sections of the fields, furthermore, needed herbicide treatment significantly less frequently. In those areas where weed density remained below the weed control threshold, flora and fauna was allowed to establish largely without disturbances.

Requirements for the technical realisation of site-specific weed control in practice are the development of automatic systems for weed detection as well as sprayers that allow changes of herbicides and herbicide rates in the process of spraying.

New decision models that consider heterogeneous soil parameters in addition to heterogeneities in the weed distribution within fields have the potential to increase the efficiency of site-specific weed control.

The causes of the yield variations within fields were analysed with the purpose of including site-specific weed control in the wider framework of precision farming and of optimising the input of resources. As limiting factors for the yield were identified: soil properties and topographies that influenced a field's water supply; the management history of the field, affecting the soil's nutrient and carbon contents; and high weed densities in certain sections of the field.

If there are naturally occurring sources for yield variations, input of fertilisers and seeding density are to be adapted to the heterogeneous yield expectations. This means in practice that site-specific fertiliser input has to be varied according to the changing nutrient uptake and that in field sections with low yield expectations seeding rate has to be lower than in sections in which a high yield is expected.

In fields in which the yield variations are management-induced, the factors that caused the variations have to be overcome by applying site-specific management strategies. Suitable long-term measures include the compensation for nutrient deficits within fields by site-specific fertilization and the reduction of weed density in weed patches.



## A Inhaltsverzeichnis

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>A</b>  | <b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>  | <b>I</b>   |
| <b>B</b>  | <b>VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN .....</b>   | <b>III</b> |
| <b>C</b>  | <b>VERZEICHNIS DER TABELLEN .....</b>  | <b>V</b>   |
| <b>D</b>  | <b>VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN .....</b>   | <b>VI</b>  |
| <b>1</b>  | <b>EINLEITUNG .....</b>  | <b>1</b>   |
| <b>2</b>  | <b>LITERATURÜBERSICHT .....</b>  | <b>2</b>   |
| 2.1       | Der präzise Pflanzenbau in der praktischen Anwendung .....   | 2          |
| 2.1.1     | Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung .....  | 5          |
| 2.1.1.1   | Erfassung der Unkrautverteilung .....  | 6          |
| 2.1.1.2   | Verarbeitung raumbezogener Daten .....   | 9          |
| 2.1.1.2.1 | Geostatistik .....   | 9          |
| 2.1.1.2.2 | Geo-Informationen-System .....   | 9          |
| 2.1.1.3   | Entscheidungsalgorithmen für die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle .....                                  | 10         |
| 2.1.1.4   | Umsetzung der teilschlagspezifischen Bekämpfungsmaßnahmen .....  | 11         |
| 2.1.2     | Verknüpfung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle mit anderen präzisen pflanzenbaulichen Maßnahmen ..... | 12         |
| 2.2       | Sozioökonomische Rahmenbedingungen der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle .....                           | 15         |
| 2.2.1     | Politische Vorgaben .....  | 15         |
| 2.2.2     | Gesellschaftliche Anforderungen an die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle .....                            | 16         |
| 2.2.2.1   | Wirtschaftlichkeit der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle .....   | 16         |
| 2.2.2.2   | Ökologischer Nutzen der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle .....  | 18         |
| <b>3</b>  | <b>PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>   | <b>20</b>  |
| <b>4</b>  | <b>MATERIAL UND METHODEN .....</b>   | <b>21</b>  |
| 4.1       | Versuchsstandort .....   | 21         |
| 4.2       | Datenerhebung .....  | 21         |
| 4.2.1     | Unkrauterfassung im Feld .....   | 21         |
| 4.2.2     | Kartierung der Unkrautverteilung .....   | 22         |
| 4.2.3     | Erfassung der Bodenparameter .....   | 22         |
| 4.2.4     | Erstellung von Karten über Bodenparameter .....  | 23         |
| 4.2.5     | Ertragserfassung .....   | 23         |
| 4.2.6     | Zusätzliche Flächeninformationen .....   | 24         |
| 4.2.6.1   | Kartenmaterial .....   | 24         |
| 4.2.6.2   | Ackerschlagkartei .....  | 25         |
| 4.3       | Unkrautbekämpfungsmaßnahmen .....  | 25         |
| 4.3.1     | Teilschlagspezifische Herbizidapplikation .....  | 26         |
| 4.3.1.1   | Erstellung von Applikationskarten .....  | 26         |
| 4.3.1.2   | Umsetzung der Applikationskarten .....   | 27         |
| 4.3.2     | Weitere chemische und mechanische Bekämpfungsmaßnahmen .....   | 28         |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.4      | Geoinformationssystem .....  | 28        |
| <b>5</b> | <b>ERGEBNISSE .....</b>  | <b>29</b> |
| 5.1      | Ursachen für Ertragsunterschiede auf Ackerschlägen.....  | 29        |
| 5.1.1    | Genauigkeit des Ertragserfassungssystems CERES 2 .....   | 29        |
| 5.1.2    | Bewirtschaftungshistorie .....   | 31        |
| 5.1.3    | Bodeneigenschaften und Relief.....   | 35        |
| 5.1.4    | Unkraut .....  | 36        |
| 5.2      | Ökonomischer und ökologischer Nutzen der teilschlagspezi-<br>fischen Unkrautbekämpfung .....   | 45        |
| 5.2.1    | Herbizideinsparung .....   | 45        |
| 5.2.2    | Monetäre Einsparung.....   | 47        |
| 5.2.3    | Häufigkeit von chemischen Unkrautkontrollmaßnahmen und<br>ihre räumliche Verteilung .....      | 49        |
| <b>6</b> | <b>DISKUSSION UND AUSBLICK .....</b>   | <b>53</b> |
| 6.1      | Bewertung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle im<br>praktischen Einsatz.....           | 53        |
| 6.1.1    | Technische Umsetzung.....  | 53        |
| 6.1.2    | Ökonomische Bewertung .....  | 58        |
| 6.1.3    | Ökologische Aspekte .....  | 60        |
| 6.2      | Bewertung kleinräumiger Ertragsunterschiede und Konsequen-<br>zen für die Bewirtschaftung..... | 62        |
| 6.2.1    | Natürliche Ursachen.....   | 62        |
| 6.2.2    | Anthropogene Ursachen .....  | 65        |
| <b>7</b> | <b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>   | <b>67</b> |
| <b>8</b> | <b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>  | <b>70</b> |

## B Verzeichnis der Abbildungen

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Abb. 2.1: | Flussdiagramm für die Anwendung des präzisen Pflanzenbaus<br>(verändert nach MURPHY et al., 1994) .....  | 2  |
| Abb. 4.1: | CERES 2 Ertragserfassungs-System der Firma RDS® .....  | 24 |
| Abb. 4.2: | Schema der DGPS-gesteuerten Pflanzenschutzspritze mit separat<br>geschalteten Teilbreiten und Regulierung der Ausbringmenge<br>(GERHARDS et al., 2000).....  | 27 |
| Abb. 5.1: | Regressionsgeraden der mit dem Ertragssensor CERES 2<br>gemessenen Erträge mit den auf der Brückenwaage ermittelten<br>Erntemengen von Gerste, Weizen, Roggen, Hafer, Sonnenblume<br>und Ackerbohne sowie der Kombination aller Messwerte..... | 30 |
| Abb. 5.2: | Karten über die Verteilung von Ertrag (A), Ackerzahlen und<br>Höhenlinien (B), Feldhistorie (C), Phosphat-, Kalium- und<br>Humusgehalt (D,E,F) und pH-Wert (G) auf Schlag 4 des<br>Dikopshofes .....   | 33 |
| Abb. 5.3  | Unkrautverteilungskarten von Feld-Ehrenpreis ( <i>Veronica arvensis</i> ;<br>A-E) und Weißen-Gänsefuß ( <i>Chenopodium album</i> ; F-H) aus den<br>Jahren 1994 und 1995 sowie 1998-2000 auf Schlag 4 des<br>Dikopshofes .....                  | 34 |
| Abb. 5.4: | Ertragskarten der Jahre 1998 in Winterweizen (A) und 2000 in<br>Sommerraps (B), Karte der Reichsbodenschätzung und der<br>Höhenlinien (C) sowie Luftbildkarte des Jahres 1978 von Schlag 7<br>des Dikopshofes .....                            | 38 |
| Abb. 5.5: | Ertragskarten der Jahre 1999 in Winterweizen (A) und 2000 in<br>Wintergerste (B) sowie Karte der Reichsbodenschätzung mit<br>Höhenlinien (C) von Schlag 8 des Dikopshofes; der Rahmen<br>markiert den Bereich der Unkrautbonitur .....         | 39 |
| Abb. 5.6: | Ungrasverteilungskarten vor der Herbizidapplikation (A,D,G,K),<br>nach der Herbizidapplikation (C,F,I,M) und bei der Ernte (J,N)<br>sowie Herbizidapplikationskarten (B,E,H,L) der Jahre 1997 bis<br>2000 von Schlag 8 des Dikopshofes .....   | 40 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Abb. 5.7:  | Ertragskarten der Jahre 1998 in Körnermais (A) und 2000 in Winterweizen (B) sowie Karte der Reichsbodenschätzung mit Höhenlinien (C) von Schlag 9 des Dikopshofes; der Rahmen markiert den Bereich der Unkrautbonitur.....                                       | 41 |
| Abb. 5.8:  | Verteilungskarten der Ungräser (A,B,C), von Vogel-Knöterich ( <i>Polygonum aviculare</i> ) (D,E,F) und Weißen-Gänsefuß ( <i>Chenopodium album</i> ) (G,H) der Jahre 1998-2000 auf Schlag 9 des Dikopshofes .....   | 42 |
| Abb. 5.9:  | Ertragskarten der Jahre 1998 (A) und 1999 (B) sowie Karte der Höhenlinien (C) von Schlag 6 des Dikopshofes.....  | 43 |
| Abb. 5.10: | Verteilungskarten von Kletten-Labkraut ( <i>Galium aparine</i> ) vor der Bekämpfung der Jahre 1998 (A), 1999 (D), 2000 (G) und bei der Ernte 1998 (C), 1999 (G) sowie Herbizidapplikationskarten der Jahre 1998 (B), 1999 (E) von Schlag 6 des Dikopshofes ..... | 44 |
| Abb. 5.11: | Verknüpfung der Applikationskarten für die teilschlagspezifische Herbizidapplikation der Jahre 1997 - 2000 (hell = selten behandelt; dunkel = häufig behandelt).....   | 52 |
| Abb. 6.1:  | Verteilungskarten von <i>Galium aparine</i> in Wintergerste im Herbst 1998 ermittelt über Rasterbonitur mit linearer Interpolation und durch visuelles Abscannen des Feldes sowie die Verschneidung der beiden Verteilungskarten .....                           | 55 |

## C Verzeichnis der Tabellen

|   |    |
|---|----|
| Tab. 2.1: Auslöser für Ertragsunterschiede innerhalb von Ackerschlägen<br>(nach DOERGE, 1999).....  | 5  |
| Tab. 2.3: Experimentell verwirklichte Herbizideinsparungen durch<br>teilschlagspezifisches Unkrautmanagement in verschiedenen<br>Kulturen .....   | 16 |
| Tab. 4.1: Größe und Felderfolge der Versuchsflächen .....   | 21 |
| Tab. 4.2: Anzahl der durchgeführten Unkrautkontrollmaßnahmen gegen<br>dikotyle Unkräuter und Ungräser in den angebauten Kulturen im<br>Versuchszeitraum 1997 bis 2000 .....   | 25 |
| Tab. 5.1: Vergleich der über das RDS-Ertragserfassungs-System CERES 2<br>ermittelten Kornerträge mit den auf der Hofwaage gewogenen<br>Erträgen .....   | 31 |
| Tab. 5.2: Flächenanteile der Versuchsflächen, die bei der<br>teilschlagspezifischen Herbizidapplikation in den Jahren 1997-<br>2000 nicht (0,0 x), mit geringer (0,6 x), mittlerer (0,8 x) oder voller<br>Herbiziddosis (1,0 x) behandelt wurden. ....  | 45 |
| Tab. 5.3: Einsparungen an Herbiziden [%] gegen Ungräser und dikotyle<br>Unkräuter in den Kulturen Körnermais, Zuckerrüben, Winterweizen<br>durch teilschlagspezifische Applikation verglichen mit<br>ganzflächiger Applikation im Versuchszeitraum 1997-2000.....   | 46 |
| Tab. 5.4: Kosten für Herbizide [€/ha] bei der teilflächenspezifischen<br>Kontrolle (TF) auf den Versuchsflächen verglichen mit<br>ganzflächiger Ausbringung (GF) in den Jahren 1997-2000 in<br>Körnermais, Wintergerste, Winterweizen und Zuckerrüben<br>(aufgrund der Maismonokultur auf Schlag GH liegen zwei Werte<br>für Mais vor)..... | 48 |
| Tab. 5.5: Teilflächen [%] mit unterschiedlich häufiger Behandlung durch<br>Herbizide (im Bandverfahren, ganzflächig, teilschlagspezifisch)<br>über den Versuchszeitraum 1997 - 2000.....  | 51 |

## D Verzeichnis der Abkürzungen

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| %                             | Prozent   |
| a                             | Jahr  |
| Abb.                          | <b>Abbildung</b>  |
| bzw.                          | beziehungsweise   |
| ca.                           | <b>circa</b>  |
| CCD                           | Halbleiter-Bildsensor( <b>charge coupled device</b> )   |
| cm                            | Zentimeter  |
| dGPS                          | <b>differential Global Positioning System</b>           |
| Dik.                          | <b>dikotyle</b> Unkräuter                               |
| DM                            | <b>Deutsche Mark</b>                                    |
| dt                            | <b>Dezitonne</b>  |
| et al.                        | und andere ( <b>et alii</b> )                           |
| €                             | Euro  |
| g                             | <b>Gramm</b>  |
| Gr.                           | <b>Ungräser</b>   |
| GIS                           | <b>Geo-Information-System</b>                           |
| GPS                           | <b>Global Positioning System</b>                        |
| h                             | Stunde ( <b>hora</b> )                                  |
| ha                            | <b>Hektar</b>   |
| K <sub>2</sub> O              | <b>Kaliumoxid</b>                                       |
| Kap.                          | <b>Kapitel</b>  |
| Kart.                         | <b>Kartoffeln</b>                                       |
| kg                            | <b>Kilogramm</b>  |
| KM                            | <b>Körnermais</b>                                       |
| m                             | <b>Meter</b>  |
| Max.                          | <b>Maximum</b>  |
| mg                            | <b>Milligramm</b>                                       |
| MHz                           | <b>Megahertz</b>  |
| Min.                          | <b>Minimum</b>  |
| N                             | Stickstoff  |
| NN                            | <b>normal Null</b> (Meereshöhe)                         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | <b>Phosphorpentoxid</b>                                 |
| pH                            | negativer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration |
| PC                            | <b>Personalcomputer</b>                                 |
| PSM                           | <b>Pflanzenschutzmittel</b>                             |

|           |   |
|-----------|---|
| $r^2$     | Bestimmtheitsmaß  |
| RDS®      | Hersteller des Ertragssensors                                 |
| spp.      | Bezeichnung aller Arten innerhalb dieser Familie oder Gattung |
| $s_x$     | Standardabweichung  |
| Tab.      | <b>T</b> abelle   |
| u.a.      | <b>u</b> nter <b>a</b> nderem                                 |
| vgl.      | <b>v</b> er <b>g</b> leiche                                   |
| WG        | <b>W</b> inter <b>g</b> erste                                 |
| WGS       | <b>W</b> orld <b>G</b> eographic <b>S</b> ystem               |
| WW        | <b>W</b> inter <b>w</b> eizen                                 |
| $\bar{x}$ | arithmetisches Mittel   |
| ZR        | <b>Z</b> uckerrüben   |
| z.B.      | zum <b>B</b> eispiel  |

## 1 Einleitung

Seit langem ist bekannt, dass innerhalb einzelner Ackerschläge Ertragsunterschiede auftreten. Die Ursachen für derartige Ertragsunterschiede sind vielfältig und beeinflussen sich oft gegenseitig.

Neben wechselnden Bodeneigenschaften und Unterschieden in der Wasserversorgung, die einen wesentlichen Einfluss auf den Ertrag haben, werden auf vielen Flächen starke Unterschiede bezüglich der Unkrautdichte beobachtet, die sich ebenfalls auf den Ertrag der Kulturpflanzen auswirken. All diese Heterogenitäten innerhalb einzelner Ackerschläge begründen die Forderung nach einer teilschlagspezifischen Bewirtschaftung der Schläge.

In der Vergangenheit war es kaum möglich, auf schlaginterne Unterschiede zu reagieren. Es fehlte die Technik, Heterogenitäten ortskodiert zu erfassen. Auch war es kaum möglich, die zu ergreifenden Maßnahmen teilschlagspezifisch und genau positioniert durchzuführen. Dieses Hindernis wurde mit der Einführung des Globalen-Positionierungs-System (GPS) beseitigt. Die Methoden zur Erfassung von kleinräumigen Heterogenitäten und zur Umsetzung von teilschlagspezifischen Maßnahmen stehen momentan im Mittelpunkt der technischen Entwicklung des Präzisionspflanzenbaus und sind teilweise bereits weit vorangeschritten.

In vielen Bereichen des präzisen Pflanzenbaus fehlen jedoch noch angemessene Entscheidungsmodelle und Expertensysteme, um die pflanzenbaulich nötigen und betriebswirtschaftlich optimalen Maßnahmen kleinräumig umzusetzen. In der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung muss beispielsweise das Prinzip der ökonomischen Schadensschwelle an die Teilschlagbewirtschaftung angepasst werden. Die Erfassung der Unkrautverteilung, die Beobachtung der Dynamik von Unkrautpopulationen sowie das Verständnis der Wechselwirkungen kleinräumig variierender Wachstumsbedingungen auf die Konkurrenzkraft von Unkraut und Kulturpflanze kann zur Entwicklung der Entscheidungsmodelle beitragen. Die Vielzahl der relevanten raumbezogenen Informationen müssen zur Bestimmung der Wechselwirkungen miteinander räumlich, zeitlich und kausal in Bezug gesetzt werden. Die Analyse der verschiedenen Faktoren und ihrer Wechselwirkungen im Feldmaßstab kann beispielsweise dazu genutzt werden, die Auslöser zu identifizieren, die zusätzlich zum Unkrautauftreten für die Heterogenitäten des Ertrags verantwortlich sind. Expertensysteme und Geografische-Informationen-Systeme (GIS) sind die geeigneten Werkzeuge solche Verrechnungen durchzuführen. Sie stellen daher das Kernelement der Datenverwaltung im präzisen Pflanzenbau dar.



## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Der präzise Pflanzenbau in der praktischen Anwendung

EHLERT (1994) definiert den präzisen Pflanzenbau als Produktionsverfahren zur zielgerichteten ortsdifferenzierten Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen unter Berücksichtigung kleinräumiger natürlicher Wachstumsbedingungen für Kulturpflanzen. In einer anderen Definition von PIERCE und NOWAK (1999) wird der präzise Pflanzenbau als die Anwendung von Technologien und Prinzipien zum Management räumlicher und zeitlicher Variabilität, verbunden mit allen Aspekten der landwirtschaftlichen Produktion und dem Ziel der Verbesserung der Wachstumsbedingungen von Kulturpflanzen und Minimierung der ökologischen Auswirkungen beschrieben.

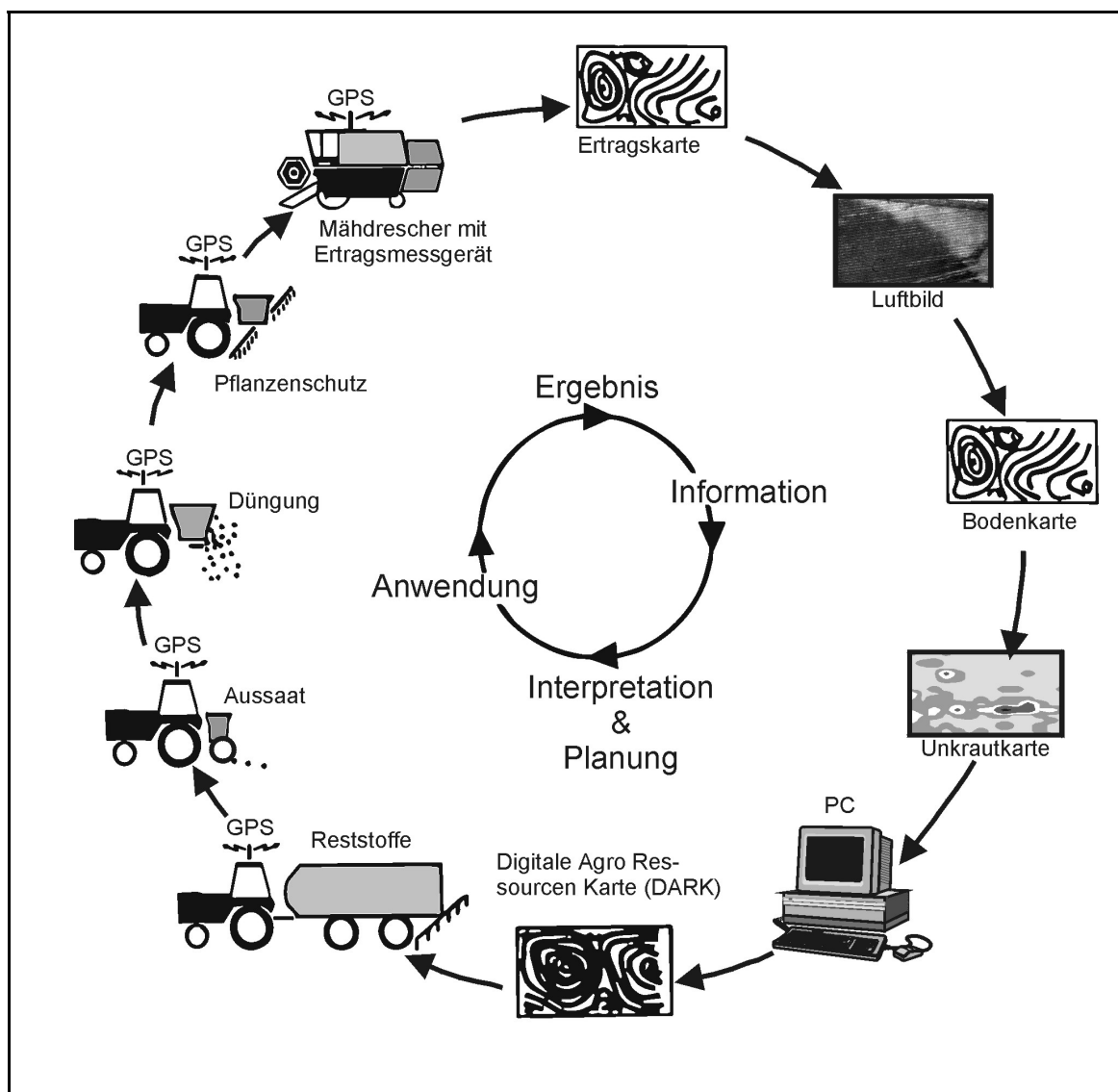


Abb. 2.1: Flussdiagramm für die Anwendung des präzisen Pflanzenbaus (verändert nach MURPHY et al., 1994)

Aus den beiden Definitionen geht hervor, dass die Grundlage des präzisen Pflanzenbaus die Erfassung und Lokalisierung kleinräumiger Unterschiede in Ackerflächen ist. Neben der Entwicklung neuer Technologien zur sensorischen Erfassung der Heterogenitäten und Durchführung teilschlagspezifischer Kulturmaßnahmen sind vor allem neue Entscheidungsmodelle nötig, die auf die kleinräumigen Unterschiede in Acker schlägen eingehen.

In Abbildung 2.1 (verändert nach MURPHY et al., 1994) sind die wesentlichen Komponenten für die Umsetzung der teilflächenspezifischen Kulturmaßnahmen im zeitlichen Ablauf vom Informationsgewinn durch Sensoren oder Karten über die Entscheidungsfindung durch Verknüpfung von Informationen und die Durchführung der teilschlagspezifischen Kulturmaßnahmen bis zur Erfolgskontrolle und Dokumentation dargestellt. Diese Verfahrensschritte sind allen Anwendungen des präzisen Pflanzenbaus gemeinsam. Man unterscheidet in Abhängigkeit davon, inwieweit die Schritte zeitlich getrennt voneinander ablaufen, zwischen Online- und Offline-Verfahren.

Im Offline-Verfahren, z.B. dem von SÖKEFELD et al. (2000) beschriebenen Verfahren zur kartenbasierten präzisen Herbizidapplikation, kann zwischen den Verfahrensschritten ein zeitlicher Verzug liegen, wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Im ersten Schritt werden die Unkräuter kartiert und die Ergebnisse gespeichert. Anschließend wird nach der Datenauswertung die Behandlungsentscheidung getroffen und schließlich wird im letzten Schritt das Herbizid teilschlagspezifisch appliziert. Ein unverzichtbares Element des Offline-Verfahrens ist das differentielle Globale-Positionierungs-System (dGPS), mit dem es möglich ist, die auf dem Feld erfassten Daten mit genauen Ortskoordinaten zu versehen und bei der zeitlich versetzten Umsetzung der Behandlungsmaßnahmen die Position des Schleppers zu bestimmen.

Im Online-Verfahren werden Informationsgewinn, Datenverarbeitung und die Reaktion am ausführenden Gerät in Echtzeit während einer Überfahrt durchgeführt. Dieser Weg wird z.B. für die sensorgesteuerte Stickstoffausbringung bei Wintergetreide (HEEGE und REUSCH, 1997) beschritten, bei der über eine radiometrische Messung der Chlorophyllgehalt der Blätter bestimmt wird. Mit diesem Wert sind Rückschlüsse auf die Stickstoffversorgung der Pflanzen möglich. Eine Speicherung der Sensordaten und eine Positionsbestimmung ist bei diesem Verfahrensansatz lediglich zur Dokumentation und Überprüfung der durchgeführten Maßnahmen erforderlich.

In der praktischen Anwendung befinden sich Verfahren zur teilschlagspezifischen Düngung der Grundnährstoffe (LÜTTICKEN, 1999) und der Aussaat (BARNHISEL et al., 1996). Im Pflanzenschutz sind Verfahren zur präzisen Unkrautkontrolle (siehe Kap. 2.1.1) sowie der Fungizid- (BJERRE, 1999) und Nematizidausbringung (EVANS et al., 1999) in der Entwicklung.

Das Ziel aller auf einer Fläche durchgeführten Maßnahmen ist die Sicherung und Steigerung des Ertrags. Für viele Kulturpflanzen kann die Ertragsverteilung mit Sensoren am Erntegerät gemessen und über den Ortsbezug mittels dGPS als Karte dargestellt werden.

Am weitesten verbreitet ist die Ertragskartierung mit dem Mähdrescher (EHLERT, 2000). Man unterscheidet zwischen Systemen, die den Massenstrom oder den Volumenstrom messen. Bei der Massenstromermittlung wird die Kraftentwicklung des Gutstroms auf ein Prallblech im Elevatorkopf oder die Dämpfung schwacher radiometrischer Strahlung durch das Erntegut gemessen. Bei der Volumenstrommessung wird z.B. die Füllhöhe des Erntegutes auf den Elevatorpaddeln erfasst. Eine Kartierung des Kartoffelertrags kann mit einer Massenstromermittlung erfolgen, bei der die Erntemenge mit einer Prallplatte gemessen wird, auf die das Erntegut geleitet wird (EHLERT, 1999a). Eine derartige Messung ist auch für Zuckerrüben in der Erprobung. Zur Ertragserfassung mit dem Feldhäcksler sind Verfahren in der Entwicklung, die nach dem Prinzip der Volumen- oder Massenstrommessung arbeiten (EHLERT, 1999b).

In den Ertragskarten spiegeln nach DOERGE (1999) die auftretenden Ertragsunterschiede natürliche und durch das Management bedingte Ursachen für die Variabilitäten wider (vgl. Tab. 2.1). Die Topographie innerhalb einer Fläche identifizierten KRAVCHENKO und BULLOCK (2000) als Auslöser für Ertragsunterschiede. Dabei sind Hangneigung und Ausrichtung der Fläche wichtige Größen (CHANGERE und LAL, 1997). Entscheidenden Einfluss hat das Relief auf die Wasserversorgung der Kulturpflanzen und damit auf die Höhe des Ertrages (AFYUNI et al., 1993; DANIELS et al., 1987; FIEZ et al., 1994). Aber auch die Verteilung von Pflanzennährstoffen und Humus sowie die Textur des Bodens ist damit korreliert (KRAVCHENKO und BULLOCK, 2000; MILLER et al., 1988). Durch eine Interpretation mehrjähriger Ertragskarten kann bei den Managemententscheidungen auf diese Variabilität eingegangen werden. Nach LARK und WHEELER (2000) ist das Ziel der Analyse der Ertragskarten eine Unterteilung von Ackerschlägen in Sektoren, in denen gleiche Faktoren limitierend für den Ertrag sind. In vielen Fällen ist die Interpretation der Ertragsverteilung jedoch schwierig und auch nicht über die Jahre einheitlich, da der Ertrag das Ergebnis sehr vieler und komplexer, miteinander in Wechselwirkung stehender Faktoren ist, die in den Jahren unterschiedlich ausgeprägt wirken.

Tab. 2.1: Auslöser für Ertragsunterschiede innerhalb von Ackerschlägen (nach DOERGE, 1999)

| Auslöser der Variabilität des Ertrages          | Beispiel   |
|---|--|
| <u>standortbedingt</u>                          |  |
| Witterung                                       | Niederschlag (Menge und Häufigkeit), Einstrahlung, Wind, Temperatur  |
| Bodenwasserhaushalt                             | Wasserhaltevermögen, Tiefgründigkeit   |
| bodenphysikalische und –chemische Eigenschaften | Textur, Nährstoffverfügbarkeit<br>pH-Wert, organische Substanz, Kationenaustauschkapazität   |
| Relief  | Erosionsneigung, Erwärmung, Wasserversorgung   |
| Schädlings- und Krankheitsbefall                | Unkräuter, Insekten, Pilze, Makrofauna   |
| Landschaftsbild                                 | Bäume, Hecken, Gewässer  |
| <u>durch die Bewirtschaftung bedingt</u>        |  |
| Bestandesführung                                | Sortenwahl, Saat, Düngung, Pflanzenschutz  |
| Feldhistorie                                    | Felderfolge, Bodenbearbeitung<br>frühere Strukturen wie Nutzungsgrenzen, Wege, Bauten, Hecken, Bäume<br>Nutzungsänderung z.B. Umwandlung von Grünland zu Acker |

### 2.1.1 Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung

Als Grundlage für die Durchführung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle gilt die Erkenntnis, dass Unkräuter in der Regel nicht homogen innerhalb von Ackerflächen verteilt sind, sondern meist nester- oder streifenweise in hoher Dichte auftreten. In anderen Feldabschnitten kommen sie dagegen nicht oder in sehr geringer Dichte vor (MARSHALL, 1988; THORNTON et al., 1990; MORTENSEN et al., 1993; CARDINA et al., 1995; GERHARDS et al., 1996b). Eingehend auf diese Verteilungsmuster ist es möglich, wie von MILLER et al. (1995) und NORDMEYER et al. (1996) vorgeschlagen, das Unkrautmanagement den Verhältnissen in den unterschiedlichen Teilflächen anzupassen. Technische Voraussetzungen für die Durchführung der teilschlagspezifischen Unkraut-

kontrolle sind Sensoren zur Erkennung des Unkrautes und eine Technologie zur präzisen Applikation von Herbiziden. Zusätzlich ist die Entwicklung von teilflächenbezogenen Entscheidungsalgorithmen erforderlich.

### 2.1.1.1 Erfassung der Unkrautverteilung

Zur Erfassung der Unkrautverteilung auf Ackerschlägen gibt es verschiedene Methoden: die manuelle Kartierung und eine sensorgestützte automatische Erkennung von Unkräutern.

Die Methoden zur manuellen Bonitur der Unkrautsituation auf den Feldern unterscheiden sich in ihrer Genauigkeit und dem benötigten Zeitaufwand.

Bei der Rasterbonitur werden Unkräuter an den Schnittpunkten eines gedachten, über die Fläche gelegten Gitters ausgezählt. Die Unkrautkartenerstellung erfolgt dann über geostatistische Berechnungen und eine Interpolation zwischen den punktbezogenen Daten. Die Genauigkeit dieser Methode ist abhängig von der Maschenweite des Gitters. Verglichen mit einem 10 m \* 10 m Raster nahm die Genauigkeit der Unkrautkartierung bei einem Raster von 20 m \* 20 m in einem Versuch von HEISEL et al. (1996a) deutlich ab. In einem anderen Versuch von CLAY et al. (1999) ergab eine Änderung der Rasterweite von 15 m \* 30 m auf 30 m \* 30 m annähernd gleiche Verteilungskarten. Ursache für die widersprüchlichen Ergebnisse sind wahrscheinlich die unterschiedlichen Verteilungsmuster verschiedener Unkrautarten und unterschiedliche Unkrautdichten in den untersuchten Flächen. In jedem Fall ist es vorteilhaft, das Messraster so fein wie möglich zu wählen, um auch kleine Unkrautnester, beispielsweise Distelnester (*Cirsium arvense*), zu erfassen (GERHARDS et al., 1996a).

In Abhängigkeit von der Rasterweite und der Größe der untersuchten Fläche an jeder Boniturstelle variiert der Zeitaufwand, der für diese Art der Unkrauterfassung nötig ist. Für eine Bonitur in einem Raster von 20 m \* 20 m benötigten NORDBO et al. (1994) bei einer Größe der Zählstellen von 0,25 m<sup>2</sup> 4,36 h/ha. Bei SCHWARZ und WARTENBERG (1999) dauerte die Bonitur in einem Raster von 50 m \* 50 m bei einer Beprobungsfläche von je 0,5 m<sup>2</sup> in Abhängigkeit von der Stärke der Verunkrautung zwischen 2,5 h/ha und 4,5 h/ha.

Eine weitere Möglichkeit der Unkrautkartierung ist das von COLLIVER et al. (1996) beschriebene Umlaufen von Flughafnernestern im nordamerikanischen Sommergetreideanbau. Dabei werden die Ortskoordinaten der Unkrautnester mit Hilfe eines GPS-Empfängers aufgezeichnet. Der hierfür nötige Zeitaufwand wird mit 28 min/ha angegeben. Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass die Konturen der Unkrautnester gut zu erkennen sind. Helfen können hier Daten aus vorangehenden Jahren oder im Vor-

jahr bei der Ernte vom Mähdrescher aus kartierte Unkrautnester. Der Nutzen dieser Informationen ergibt sich aus der Feststellung, dass die Flughafernester räumlich und zeitlich stabil bleiben und daher auf Grundlage dieser Karten in den Folgejahren Bekämpfungsmaßnahmen umgesetzt werden können.

Bei der sensorgestützten Unkrautkartierung unterscheidet man zwischen Fernerkundungsaufnahmen und Verfahren zur Unkrauterkenennung im Nahbereich mit Sensoren, die an einem Fahrzeug angebracht sind.

Fernerkundungsdaten für die Unkrautkartierung können aus Luftbildaufnahmen stammen (LAMB et al., 1999; LAMB und BROWN, 2001). Luftbildaufnahmen, die mit einer CCD-Kamera in vier Spektralbereichen mit einer Auflösung von 1 m gemacht wurden, dienten MEDLIN et al. (2000) in Sojabohnen, die sich im 4- bis 8-Blattstadium befanden, zur Kartierung der in den untersuchten Feldern dominierenden Unkrautarten *Senna obtusifolia*, *Ipomoea lacunosa* und *Solanum carolinense*. Die Unkräuter waren zum Zeitpunkt der Kartierung etwa 5 cm bis 10 cm groß und hatten 1 bis 6 Laubblätter. Dieser Kartierungstermin war der spätest mögliche für eine wirksame Nachauflaufbekämpfung der Unkräuter. Trotz der Größe der Unkrautpflanzen gelang eine Identifizierung der Unkrautnester erst ab einer Pflanzendichte von mehr als 10 Pflanzen/m<sup>2</sup>. Da die Bekämpfungsschwelle bei 1 Pflanze/m<sup>2</sup> lag, reichten die Kartierungsergebnisse nicht aus, um eine Behandlungsentscheidung für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung zu treffen.

LAMB et al. (1999) konnten mit multispektralen Bildern, bei einer Auflösung von 0,5 m, Populationen von *Avena* spp. mit einer Pflanzendichte von über 17 Pflanzen/m<sup>2</sup> in einem Triticalefeld erkennen. Bei einer Bildauflösung von 2 m konnten Populationen erkannt werden, die eine Dichte von über 23 Pflanzen/m<sup>2</sup> aufwiesen. Kulturpflanzen und Ungräser waren zum Zeitpunkt der Aufnahme im 2- bis 5-Blattstadium. Die Unkrautartenerkennung war mit dieser Methode der Kartierung infolge der geringen Bildauflösung nur eingeschränkt möglich. Im vorliegenden Fall war bekannt, dass *Avena* spp. die dominierende Unkrautart war. Eine Unterscheidung von Teilflächen mit verschiedenen hohen Unkrautdichten war in Einzelfällen jedoch praktikabel. Diese Informationen könnten genutzt werden, um die einzelnen Teilflächen gezielter zu untersuchen.

Im Nahbereich kommen meist optoelektronische Sensoren zum Einsatz, die am Schlepper montiert sind. Es gibt hier zwei unterschiedliche Ansätze in der Entwicklung. Im ersten Fall wird mit Hilfe der digitalen Bildanalyse eine Erkennung von Unkräutern und Kulturpflanzen anhand von Form-, Textur- und Farbmerkmalen durchgeführt. SÖKEFELD et al. (2000) beschreiben ein bildanalytisch arbeitendes System zur Unkrauterkenennung über Formmerkmale. Die Pflanzen wurden mit einer CCD-Kamera auf-

genommen. Nach einer Binarisierung und Konturextraktion der Grauwertbilder in Echtzeit folgte das Erkennungsverfahren über einen Vergleich der unbekannten Pflanze mit vorher gespeicherten Musterpflanzen aus einer Wissensbasis. Neben den Merkmalen Form und Größe diente vor allem die äußere Kontur der Pflanzen, die in einer Fourieranalyse ermittelt wird, als Erkennungsmerkmal. CHAPRON et al. (1999) und PEREZ et al. (2000) nutzten für die Unkrautartenerkennung farbige Bilder, die eine Unterscheidung zwischen Boden und Pflanze vereinfachten. Anschließend wurde auch hier eine Erkennung über Formmerkmale durchgeführt. Dem Problem von überlappenden Konturen, die eine Erkennung behindern, begegneten CHAPRON et al. (1999) durch eine Skelettierung der Blätter aller im Bild erscheinender Pflanzen. Anschließend wurde die Distanz des äußeren Blattrandes zur Mittelrippe gemessen. Dadurch konnte erstens zwischen Gräsern mit meist länglichen Blättern und dikotylen Pflanzen mit häufig runden Blättern unterschieden werden. Zweitens ergaben sich an den Überlappungsstellen verschiedener Pflanzen deutliche Abweichungen von der Distanz zwischen Mittelrippe und äußerem Rand, so dass an dieser Stelle eine Trennung der Objekte durchgeführt werden konnte.

Eine ausreichende Rechnerleistung vorausgesetzt, die eine Unkrautartenerkennung in Echtzeit ermöglicht, sollen die Sensoren zur bildanalytischen Unkrauterkenung in ein Online-Verfahren zur teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle integriert werden (SÖKEFELD et al., 2000).

Durch die Messung der spektralen Reflexion versuchten VRINDTS und DE BAERDEMAEKER (1997), BENNETT und PANNELL (1998) sowie BILLER (1998) eine Unkrautartenerkennung durchzuführen. Sowohl eine Unterscheidung zwischen Boden und Pflanze als auch zwischen Pflanzenarten erfolgt dabei über einen Abgleich der Reflektionsspektren. Während der Boden das Licht nahezu über das ganze Tageslichtspektrum linear ansteigend reflektiert, kommt es bei Pflanzen erst ab einer Wellenlänge von etwa 750 nm zu einer starken Reflektion. Dieser Unterschied wurde zur Trennung von Boden und Pflanze genutzt. Die verschiedenen Pflanzenarten hatten ebenfalls leicht voneinander abweichende Reflektionsspektren, was zur Artenerkennung genutzt wurde (BILLER et al., 1997). Im Praxiseinsatz muss ein solches System vor jeder Überfahrt geeicht werden, da sich das Reflektionsverhalten der Pflanzen in Abhängigkeit von Einflussgrößen, wie z.B. Wasserversorgung oder Ernährungszustand, ändert.

In der praktischen Anwendung befindet sich bereits das auf diesem Prinzip beruhende Online-System Detectspray® (FELTON und MCCLOY, 1992; AHRENS, 1994). Der Sensor ist in der Lage grüne Pflanzen vom Boden zu unterscheiden, nicht jedoch nach Pflanzenarten zu differenzieren. Der Einsatzbereich liegt vor allem in der teilschlagspezifi-

schen Ausbringung von nicht selektiv wirkenden Herbiziden im Voraufverfahren vor einer Mulch- oder Direktsaat.

### **2.1.1.2 Verarbeitung raumbezogener Daten**

#### **2.1.1.2.1 Geostatistik**

Bei der Erfassung der Unkrautverteilung fallen ortskodierte Daten an, die auf den Punkt der Bonitur bezogen sind. Die Darstellung als Karte erfordert es, Schätzverfahren für die Fläche zwischen den Boniturstellen anzuwenden. Die Art des zu verwendenden Schätzverfahrens ist davon abhängig, wie die Daten erfasst wurden.

Wird die Unkrautkartierung manuell durchgeführt, ist der Abstand zwischen den einzelnen Boniturstellen meist groß. In diesem Fall sind geostatistische Verfahren für die Interpolation zwischen den Messpunkten geeignet. Ursprünglich wurden diese Verfahren dazu entwickelt, im Bergwerkswesen die Ausdehnung von Lagerstätten von Bodenschätzen abzuschätzen. Ziel der Interpolation ist es, von den Punktmessungen auf die Ausbreitung innerhalb der Fläche zu schließen.

Bei der Erstellung von Unkrautkarten aus Punktmessungen im regelmäßigen Raster wurde von HEISEL et al. (1996a), JOHNSON et al. (1996) und COLBACH et al. (2000) das Kriging-Verfahren zur Schätzung der räumlichen Verteilung zwischen den Punkten angewendet. Bei dieser Methode ist es nötig, vorab ein experimentelles Semi-variogramm zu erstellen, das die Varianz zwischen den Messpunkten in Abhängigkeit von der Distanz der Messpunkte beschreibt. Das an dieses experimentelle Semi-variogramm angepasste Modell wird im Kriging-Verfahren genutzt.

Über das Interpolationsverfahren der linearen Triangulation haben GERHARDS et al. (1996a) die Unkrautdichte zwischen den Boniturstellen zur Kartenerstellung geschätzt.

Bei einer automatischen Unkrauterfassung können die Boniturstellen so nahe beieinander liegen, dass keine Interpolation nötig ist. In diesem Fall würden Unkrautkarten entstehen, deren Auflösung dem Abstand zwischen den Messpunkten entspricht.

#### **2.1.1.2.2 Geo-Informationssystem**

Räumliche Informationen liegen in Form von Karten oder anderen ortskodierten Daten vor. Geo-Informationssysteme (GIS) sind Werkzeuge zur Verarbeitung dieser Informationen. Im präzisen Pflanzenbau wird das GIS verwendet, um ortskodierte Beprobungen und daraus erstellte Karten mit vorliegendem Kartenmaterial z.B. der Landes-



vermessungsämter sowie Luft- und Satellitenbildern zu verknüpfen. Ziel dieser Operationen ist es, Ursachen für Heterogenitäten zu analysieren, Korrelationen zwischen Informationsebenen zu erkennen und in der Folge daraus abgeleitete teilschlagspezifische Managemententscheidungen zu treffen (SCHRÖDER et al., 1997; ZHANG et al., 1999). In der vorliegenden Arbeit wurde ein GIS verwendet, um aus Unkrautverteilungskarten Applikationskarten zur Steuerung der Herbizidspritze zu erstellen und um Gründe für die Variabilität der Unkrautverteilung anhand vorliegender Flächeninformationen zu identifizieren.

### **2.1.1.3 Entscheidungsalgorithmen für die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle**

Zur Erstellung von Applikationskarten in einem Offline-System bzw. für die Grenzwertsetzung in einem Online-System zur teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung sind neue Entscheidungsalgorithmen erforderlich.

Die gängigen Modelle einer ökonomischen Schadensschwelle für eine ganzflächige Herbizidausbringung (z.B. COUSENS, 1987; GEROWITT und HEITEFUSS, 1990; BLACK und DYSON, 1993; NORRIS, 1999) gehen von der Annahme einer gleichmäßigen Unkrautdicke über die gesamte Fläche aus. Die Entscheidung über eine Behandlung wird anhand weniger Boniturwerte getroffen, die aus zufällig auf dem Feld angeordneten Zählungen stammen. Aus der errechneten Unkrautdicke werden über Indizes für die Konkurrenzkraft zwischen Unkräutern und Kulturpflanzen die durchschnittlichen Ertragsverluste auf einer Fläche geschätzt, die mit den Bekämpfungskosten verglichen werden. Sind die monetären Ertragseinbußen durch Unkräuter gleich hoch oder höher als die Kosten für die Bekämpfung, wird eine Unkrautbekämpfung auf der ganzen Fläche durchgeführt. Die Heterogenität der Unkrautdicke, der Konkurrenzkraft der Unkräuter und dem Ertrag innerhalb von Ackerschlägen wird dabei nicht berücksichtigt.

THORNTON et al. (1990) sowie MAXWELL und COLLIVER (1995) beziehen die Heterogenität der Unkrautverteilung in die Kalkulation des Schwellenwertes für eine bekämpfungswürdige Unkrautdicke mit ein. Je stärker aggregiert Unkräuter auf einer Fläche verteilt sind, desto höher kann demnach die Schadensschwelle für eine ganzflächige Herbizidapplikation sein. LINDQUIST et al. (1998) konnten anhand von realen Unkrautverteilungskarten in Mais und einem Modell zur Ermittlung des Ertragsverlustes (COUSENS, 1985) nachweisen, dass der Ertragsverlust durch Unkrautkonkurrenz regelmäßig überschätzt wurde, wenn die Berechnung anhand der mittleren Unkrautdicke für den Schlag durchgeführt wurde. Ursache hierfür ist die negativ binomial verteilte Unkrautpopulation und die Tatsache, dass mit zunehmender Unkrautdicke

der Ertragsverlust je Unkrautpflanze abnimmt. Biologisch lässt sich das dadurch erklären, dass Unkräuter innerhalb eines Nestes auch untereinander konkurrieren und dadurch weniger Ertragsverlust verursachen als wenn sie gleichmäßig über das Feld verteilt sind und nur in Konkurrenz zur Kulturpflanze stehen.

In die Schadensschwelle für eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung gehen außer der Unkrautdicke noch weitere Parameter ein, die räumlich variabel sind. Bei CHRISTENSEN et al. (1996) wurde als entscheidender Parameter die über das Feld variable Ertragshöhe in das Modell integriert. Prognosen über die Ertragshöhe konnten dazu mit Hilfe mehrjähriger Ertragskarten angestellt werden. Ebenfalls wurden die Konkurrenzindizes der Unkrautarten mit einbezogen, die sich nach PALLUTT und FLATTER (1998) mit wechselnden Bodenverhältnissen ändern und damit auch teilschlagspezifisch bewertet werden können. Durch die Verarbeitung der verschiedenen Informationsebenen konnten Ackerschläge für die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle in Unkrautmanagementzonen aufgeteilt werden, in denen unterschiedliche Bekämpfungsstrategien umgesetzt wurden (CHRISTENSEN et al., 1999). Diese Bekämpfungsstrategien umfassten Maßnahmen, die von an den Standort angepassten Saatchichten bis hin zur Variation der Wirkstoffmischung und Herbiziddosis reichten.

#### **2.1.1.4 Umsetzung der teilschlagspezifischen Bekämpfungsmaßnahmen**

Zur Durchführung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle muss die Pflanzenschutzspritze so ausgestattet sein, dass die gesamte Spritze, einzelne Teilbreiten oder sogar einzelne Düsen entsprechend der vorher getroffenen Spritzentscheidung automatisch ein- oder ausgeschaltet werden können. Außerdem sollte die technische Ausstattung eine Regulierung der Herbiziddosis und einen Wechsel des Wirkstoffes während der Fahrt zulassen (STAFFORD und MILLER, 1993).

Die Steuerung der Pflanzenschutzspritze wurde in Experimenten von GERHARDS et al. (2000), wie in Abb. 4.2 dargestellt, vorgenommen. An den modifizierten Spritzcomputer wurde eine Microcontroller-Einheit zur Ansteuerung der einzelnen Teilbreiten und zur Dosisregulierung angeschlossen, die ihre Informationen aus den auf einem Laptop-Computer gespeicherten Applikationskarten bezog. Der Datenaustausch zwischen Laptop, Microcontroller-Einheit und Spritzcomputer geschah über eine RS 232-Schnittstelle.

Die Regulierung der Ausbringmenge erfordert eine Technologie, die ein gleichbleibend genaues Spritzbild mit der angestrebten Tropfengröße bei variierter Herbiziddosis gewährleistet. Da die Ausbringmenge in der Regel über eine Änderung des Flüssigkeitsdrucks im System erfolgt, kann mit Standarddüsen nur eine geringe Variation der Her-

biziddosis im Bereich von ca.  $\pm 20\%$  erreicht werden, ohne dass die Tröpfchenverteilung auf der Zielfläche verschlechtert wird.

Sogenannte luftunterstützte Düsen (z.B. Injektordüse oder Twin Fluid Düse) erlauben eine Regulierung der Ausbringmenge von ca.  $\pm 50\%$ , weil hierbei die Flüssigkeitstropfen in der Düse mit Druckluft gemischt werden und dadurch eine gleichmäßige Tropfengröße erreicht werden kann. Die Gefahr der Abtrift ist bei diesen Düsen ebenfalls vermindert (PAICE et al., 1996).

Schließlich kann die Ausbringmenge auch mit Hilfe sogenannter Frequenzdüsen im Bereich von ca.  $\pm 60\%$  geregelt werden, ohne dass der Flüssigkeitsdruck im System variiert wird (GOPALAPILLAI et al., 1999; TIAN und ZHENG, 2000). Hierbei werden die einzelnen Düsen über Magnetventile in hoher Frequenz auf- und zugeschaltet. Die Regulierung der Ausbringmenge erfolgt über eine Änderung dieser Frequenz.

Die Ideallösung der Regulierung von Ausbringmenge und Wirkstoffmischung stellt das Direkteinspeisungssystem dar. Hierbei werden die hochkonzentrierten Pflanzenschutzmittel über eine Dosierpumpe in den Flüssigkeitsstrom eingespeist (VIERI und SPUGNOLI, 1997). Neben dem Vorteil, dass damit während der Fahrt die Wirkstoffe und deren Dosierung geändert werden können, lösen die Direkteinspeisungssysteme das Problem der Restmengen im Spritztank. Daher entwickeln derzeit zahlreiche Hersteller von Pflanzenschutzspritzen derartige Systeme (z.B. Dosatron, Agroinjekt (MSR)) (AUDENAERT, 2001).

Probleme bei der Direkteinspeisung unterschiedlicher Herbizide ergeben sich zum einen aus den verschiedenen Formulierungen (Viskosität, Löslichkeit) der Mittel und zum anderen aus der Reaktionszeit des Systems. Wegen der langen Zeitdauer bis zum Erreichen der gewünschten Wirkstoffkonzentration an den Düsen ist es derzeit nur kartenbasiert im Offline-Verfahren einsetzbar, da hier die Dosis vorausschauend reguliert werden kann. Ziel der weiteren Entwicklung ist die Einspeisung der Pflanzenschutzmittel direkt an der Düse, wodurch das Problem der Verzögerung gelöst wäre und sensorgesteuerte Online-Anwendungen im Pflanzenschutz möglich wären.

### **2.1.2 Verknüpfung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle mit anderen präzisen pflanzenbaulichen Maßnahmen**

Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, ist die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle eingebunden in ein Gesamtkonzept des präzisen Pflanzenbaus. Die Nutzung der räumlichen Informationen aus den verschiedenen Bereichen des Pflanzenbaus tragen zu einer Präzisierung der Entscheidungen zur Unkrautkontrolle bei.

Informationen über die räumliche Verteilung des Ertragsniveaus auf Ackerschlägen ermöglichen es, die ökonomische Schadensschwelle teilschlagspezifisch anzupassen. Langjährig erfasste Ertragskarten können helfen, Felder in Zonen hohen oder niedrigen Ertrages einzuteilen (BLACKMORE, 2000). Ebenso können Luftbilder und Satellitenaufnahmen Aufschluss über die unterschiedliche Biomasseentwicklung in den verschiedenen Bereichen eines Schlates geben und schließlich können auch Bodenkarten hierzu beitragen (LARK et al., 1998).

Bodenkarten können außerdem wichtige Informationen dazu liefern, die Wirkstoffdosis teilflächenspezifisch anzupassen. Humus- und Tongehalt haben Einfluss auf die Effektivität eines Herbizides (BLUMHORST et al., 1990), da Wirkstoffe von Humus und Tonmineralien sorbiert werden. Bei der Ausbringung von sogenannten Bodenherbiziden, die über die Pflanzenwurzeln aufgenommen werden, sollte dies berücksichtigt werden. Durch das Verständnis der Ursachen von Heterogenität in der Unkrautverteilung ist eine gezieltere Bekämpfung möglich. Viele Unkrautarten sind in ihrem Vorkommen stark an die innerhalb eines Ackerschlates wechselnden Bodenverhältnisse und Bewirtschaftungsweisen gebunden.

ANDREASEN et al. (1991) untersuchten den statistischen Zusammenhang zwischen der Bodentextur, dem pH-Wert sowie Phosphat-, Kalium- und Humusgehalt und dem Auftreten bestimmter Unkrautarten. Es zeigte sich, dass vor allem die Textur des Bodens einen großen Einfluss hatte. Die Individuendichte der Arten Zweispaltiger-Hohlzahn (*Galeopsis bifida*), Acker-Vergissmeinnicht (*Myosotis arvensis*), Vogel-Knöterich (*Polygonum aviculare*) und Acker-Stiefmütterchen (*Viola arvensis*) nahm mit steigendem Tongehalt signifikant ab, die der Arten Kletten-Labkraut (*Galium aparine*), Rote-Taubnessel (*Lamium purpureum*), Acker-Senf (*Sinapis arvensis*) und Persischer-Ehrenpreis (*Veronica persica*) stieg an. Hier zeigte sich vor allem die Anpassung der Unkrautarten an eine unterschiedliche Wasserversorgung. In geringerem Ausmaß hatte die Variation im Gehalt an Macro- und Micronährstoffen und pH-Wert Einfluss auf die Unkrautdichte einiger Arten. In einer weiteren Untersuchung von NORDMEYER und DUNKER (1999) wurde eine hohe Dichte von Acker-Fuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) in Teilschlägen nachgewiesen, die durch einen hohen Ton- oder Magnesiumgehalt im Boden gekennzeichnet waren. Jährige-Rispe (*Poa annua*) wurde in einer hohen Dichte in Feldabschnitten gefunden, in denen der Sandanteil hoch war und Acker-Stiefmütterchen (*Viola arvensis*) wurde durch eine hohe Magnesium- und eine niedrige Phosphatkonzentration gefördert. Da sich die in diesen Studien untersuchten Faktoren oftmals wechselseitig beeinflussten, ist es allerdings schwierig einen einzelnen Auslöser für das Auftreten von Unkrautpopulationen zu identifizieren. Ebenfalls lassen

sich allein aus Bodenkarten keine Rückschlüsse auf die zu erwartende Unkrautartenzusammensetzung ziehen.

CHANCELLOR (1985) beobachtete in einer 20-jährigen Studie Variationen in der Unkrautpopulation auf einer aus Grünland hervorgegangenen ackerbaulich genutzten Fläche. Ein Teil der Fläche wurde in einem Zeitraum von 15 - 20 Jahren vor dem Grünlandumbruch bereits einmal ackerbaulich genutzt. Hier war Erdrauch (*Fumaria officinalis*) das dominierende Unkraut. Ein anderer Teil war in einem Zeitraum von 5 - 10 Jahren vor dem Grünlandumbruch in Ackernutzung. Hier dominierte Klatschmohn (*Papaver rhoeas*). Die beiden vormals unterschiedlich bewirtschafteten Feldabschnitte waren auch in ihrer übrigen Unkrautpopulation klar voneinander abzugrenzen. Als Grund wird die unterschiedliche Lebensdauer der Samen der Unkräuter angenommen, die sich in der zwischenzeitlichen Periode unter Ackernutzung etablieren konnten und bei dem erneuten Grünlandumbruch verstärkt aufliefen.

Auch SÖKEFELD et al. (1995) identifizierten eine unterschiedliche Bewirtschaftungsgeschichte innerhalb nun gleichförmig bewirtschafteter Flächen als Auslöser für die Variabilität der Unkrautgesellschaft. Eine 30 Jahre zurückliegende Teilung eines Schläges in eine ackerbaulich und eine als Grünland genutzte Teilfläche war noch darin erkennbar, dass auf der vormaligen Ackerfläche Acker-Frauenmantel (*Aphanes arvensis*) dominierte während auf dem ehemaligen Grünland Kletten-Labkraut (*Galium aparine*) in höherer Dichte vorkam. Die Etablierung von *Galium aparine* war in diesem Fall durch den höheren Humusgehalt im Bereich des ehemaligen Grünlandes zu erklären. Die vormalige Teilung eines Feldes in Bereiche mit verschiedenen stark hackfruchtbetonten Felderfolgen drückte sich ebenfalls im unterschiedlichen Vorkommen von Unkrautarten aus. Eine stark hackfruchtbetonte Felderfolge in einem Teilschlag förderte insbesondere den Weißen-Gänsefuß (*Chenopodium album*) als Frühjahrskeimer. Im Teilschlag mit höherem Getreideanteil in der Felderfolge konnten sich die Ungräser stärker etablieren.

Kontrollstrategien sind in diesen Fällen nicht nur in der akut anzuwendenden Bekämpfung aufgelaufener Unkräuter zu sehen, sondern auch in der langfristigen Beseitigung von Bedingungen, die zu einer Entstehung von Unkrautnestern geführt haben.

Unkrautverteilungskarten können weiterhin dazu dienen, die pflanzenbaulichen Maßnahmen teilflächenspezifisch anzupassen, um die Konkurrenzkraft der Kulturpflanze gegenüber den Unkräutern zu erhöhen. Die Ertragsverluste je Unkrautpflanze/m<sup>2</sup> sinken mit steigender Konkurrenzkraft der Kulturpflanze. So kann nach PALLUTT (2000) eine standortangepasste Stickstoffdüngung und Aussaatstärke den durch Unkräuter hervorgerufenen Ertragsverlust deutlich senken.

## **2.2 Sozioökonomische Rahmenbedingungen der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle**

Der Einsatz von Agrarchemikalien wird zunehmend kritisch in der Gesellschaft gesehen. Daraus abgeleitet besteht ein Bedarf für pflanzenschutzmittelsparende Technologien, die sowohl vom Landwirt als auch von der Bevölkerung und dem Gesetzgeber akzeptiert werden.

### **2.2.1 Politische Vorgaben**

Gesetzliche Bestimmung, die den Einsatz von Herbiziden beschränken, fördern die Einführung von Maßnahmen der präzisen Unkrautkontrolle, da es mit dieser Technologie möglich ist, auf Ackerflächen geringere Wirkstoffmengen gezielt auf die Teilflächen zu verteilen, auf denen sie nötig sind.

In der momentan geltenden Trinkwasserverordnung der Bundesrepublik Deutschland von 1990 und auch in der ab 2003 geltenden neuen Fassung ist der Grenzwert für die Rückstände an Pflanzenschutzmitteln und Biozidprodukten\* im Trinkwasser auf 0,0001 mg/l für jeden einzelnen Wirkstoff und auf 0,0005 mg/l für die Summe aller Wirkstoffe festgelegt. Die Einhaltung dieser Grenzwerte erfordert es, Möglichkeiten zur Reduzierung des Herbizideinsatzes zu nutzen (vgl. auch Kap. 2.2.2.2).

Darüber hinaus sind in vielen westeuropäischen Ländern Bemühungen seitens der Politik zu registrieren, die zu einer Verminderung der ausgebrachten Pflanzenschutzmittelmengen führen sollen (FALCONER, 1998). Neben einer höheren Besteuerung von Pflanzenschutzmitteln soll auch eine Förderung von umweltschonenderen Technologien als ökonomischer Anreiz dienen (FALCONER und HODGE, 2000). Beides kann die Verbreitung der Teilschlagbewirtschaftung fördern.

Weitere politische Maßnahmen, die in Schweden, Dänemark und den Niederlanden bereits Anwendung finden, sind Programme zur Reduzierung der ausgebrachten Wirkstoffmenge pro Hektar (BEAUMONT, 1993; EKSTRÖM und BERNSON, 1995; JANSMA et al., 1993). So sollte in den Niederlanden die jährlich ausgebrachte Wirkstoffmenge bis 2000 auf 50 % des Niveaus der Jahre 1985-1989 reduziert werden. Ebenfalls um 50 % sollte in zwei Schritten in Dänemark der Umfang der im Durchschnitt von 1981-1985 jährlich ausgebrachten Wirkstoffe bis zum Jahr 1997 gesenkt werden. Durch das schwedische Parlament wurde für 1995 eine Reduzierung der Wirkstoffmenge um

---

\*organische Insektizide, organische Herbizide, organische Fungizide, organische Nematizide, organische Akarizide, organische Algizide, organische Rodentizide, organische Schleimbekämpfungsmittel, verwandte Produkte (u. a. Wachstumsregulatoren) und die relevanten Metaboliten, Abbau- und Reaktionsprodukte

67 % des durchschnittlichen Niveaus der Jahre 1981–1986 beschlossen. Über die präzise Unkrautkontrolle kann erreicht werden, dass trotz dieser Restriktionen die erforderliche Wirkstoffkonzentration auf den Teilflächen, auf denen sie nötig ist, appliziert werden kann.

## **2.2.2 Gesellschaftliche Anforderungen an die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle**

### **2.2.2.1 Wirtschaftlichkeit der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle**

Der Einsatz der präzisen Unkrautkontrolle in Praxisbetrieben ist unter den in Deutschland zur Zeit geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen wesentlich davon abhängig, ob ein ökonomischer Nutzen für den Landwirt zu erzielen ist. Die Mehrkosten für die erforderliche technische Ausstattung bei der teilschlagspezifische Herbizidapplikation und die Unkrauterfassung müssen durch die Einsparungen an Herbiziden kompensiert werden.

Tab. 2.2: Experimentell verwirklichte Herbizideinsparungen durch teilschlagspezifisches Unkrautmanagement in verschiedenen Kulturen

|                           | Kultur       | Herbizideinsparung |
|---------------------------|--------------|--------------------|
| CHRISTENSEN et al. (1996) | Getreide     | 68%                |
| GERHARDS et al. (1997)    | Getreide     | 40-50%             |
| HEISEL et al. (1996b)     | Getreide     | 47-66%             |
| HEISEL et al. (1997)      | Sommergerste | 41%                |
| NORDMEYER et al. (1997)   | Getreide     | bis 80%            |
| MEDLIN und SHAW (2000)    | Mais         | 77-84%             |
| TIAN et al. (1999)        | Mais/Soja    | 48%                |
| GREEN et al. (1997)       | Erdnuss      | bis 70 %           |

In Versuchen zur teilschlagspezifischen Herbizidapplikation wurden erhebliche Potenziale zur Einsparung von Herbiziden errechnet (vgl. Tab. 2.2). In Getreide konnten zwischen 41 % und 80 % der Mittel eingespart werden (CHRISTENSEN et al., 1996; GERHARDS et al., 1997; HEISEL et al., 1996b; HEISEL et al., 1997; NORDMEYER et al., 1997). In der Felderfolge Mais-Soja lagen die Einsparpotenziale bei 48 % (TIAN et al., 1999) und in Mais bei 77 % bis 84 % (MEDLIN und SHAW, 2000). In einem Versuch zur teilschlagspezifischen Herbizidapplikation in Erdnüssen konnten bis zu 70 % der Herbizide eingespart werden (GREEN et al., 1997). Nach ORIADE et al. (1996) ist die Ein-

sparung umso höher, je stärker aggregiert die Verteilung der Unkräuter ist. Über diese Mitteleinsparung ist eine erhebliche Kostenreduktion durch die teilschlagspezifische Herbizidausbringung zu verwirklichen. Bei SCHWARZ und WARTENBERG (1999) lag die erwirtschaftete Kostenreduktion bei 20 DM/ha bis 30 DM/ha. Rechnerisch ermittelten LETTNER et al. (2001) in Abhängigkeit vom Ertragsniveau und der Größe des zu behandelnden Flächenanteils Einsparungspotenziale von 24 DM/ha bis 70 DM/ha in Winterweizen, 32 DM/ha bis 82 DM/ha in Wintergerste, 23 DM/ha bis 67 DM/ha in Winterroggen, 38 DM/ha bis 102 DM/ha in Mais und 129 DM/ha bis 302 DM/ha in Zuckerrüben.

Demgegenüber stehen die Aufwendungen, die für die Unkrauterfassung, die Verarbeitung der gesammelten Daten und die Applikationstechnik für das präzise Unkrautmanagement vom Anwender zu erbringen sind (WAGNER, 2000).

Für die Unkrauterfassung sind automatische Systeme unverzichtbar, da die Bonitur durch den Menschen zu zeitaufwendig und damit zu teuer ist (vgl. Kap. 2.1.1.1). Bei LETTNER et al. (2001) sind Kosten für die manuelle Unkrautkartierung von 20 DM/ha bis 100 DM/ha angegeben.

In einer Kalkulation der Maschinenfabrik RAU wurden für die automatische Unkrauterfassung Kosten von 17,25 DM/ha errechnet (KIFFERLE, 1999). Dieser Betrag ergibt sich aus einem Anschaffungspreis von 100.000 DM für das Gerät zur Unkrautererkennung, einer Arbeitskapazität von 800 h/a und einer Arbeitsleistung von 5 ha/h. Für die weiteren Kosten der Spritzensteuerung und des GPS-Empfängers werden in dieser Kalkulation 7.105 DM/a errechnet. Die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit wird demnach, eine durchschnittliche Herbizideinsparung von 48 DM/ha vorausgesetzt, bei einer Jahresleistung von mindestens 231 ha überschritten. Die Höhe der Herbizidkosten in einer Kultur hat nach LETTNER et al. (2001) Einfluss darauf, bei welcher Flächengröße die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit (break even) im teilflächenspezifischen Management überschritten wird. Je teurer die Herbizide sind, desto geringer muss die Einsatzfläche der Geräte im Jahr sein oder desto kleiner kann der Flächenanteil eines Schlages sein, der nicht behandelt werden muss. Insbesondere in Zuckerrüben, für die hohe Herbizidkosten angerechnet werden müssen, lohnt sich die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle also auch schon bei einem kleineren nicht zu behandelnden Flächenanteil als bei Getreide mit entsprechend geringeren Herbizidkosten.



### 2.2.2.2 Ökologischer Nutzen der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle

Die ökologischen Risiken von Pflanzenschutzmitteln lassen sich in zwei Kategorien einteilen: ökotoxische Wirkungen und Gefährdungen der menschlichen Gesundheit (GUSTAFSON, 1993). Daraus abgeleitet ergibt sich der ökologische Nutzen der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle hauptsächlich aus der Reduzierung der Herbizidmenge und dem standortgerechten Einsatzes der Herbizide. Außerdem können sich positive Effekte auf die Biodiversität in Teilflächen ergeben, die nicht mit Herbiziden behandelt werden.

Nach CARTER (2000) bilden Herbizide den Hauptbestandteil der in Grund- und Oberflächenwasser gefundenen Pflanzenschutzmittel bzw. Pflanzenschutzmittelrückstände. Eine Reduzierung der ausgebrachten Herbizidmenge ist damit im Sinne des Gewässerschutzes eine vordringliche Maßnahme und über die teilschlagspezifische Herbizidapplikation und den damit verbundenen Mitteleinsparungen zu verwirklichen (LARSON et al., 1997). Modelle von MITCHELL et al. (1996) und VERMA et al. (1998) zur Senkung der Gewässerbelastung mit Pflanzenschutzmitteln basieren auf einer teilschlagspezifischen Bewirtschaftung. In diesen Modellen wird eine Risikoabschätzung für die Verlagerung von Herbiziden in das Grund- oder Oberflächenwasser anhand von variierenden Bodeneigenschaften und der Topographie des Geländes gemacht. Aus diesen Informationen werden Hinweise für die teilschlagspezifische Dosierung von Herbiziden abgeleitet.

Artenvielfalt oder Biodiversität auf Ackerflächen ist aus unterschiedlichen Gründen wünschenswert. So bilden Unkräuter ein genetisches Reservoir, das z.B. in der Pflanzenzüchtung als Ursprung neuer Kulturpflanzen oder bei mit Kulturpflanzen verwandten Arten als Quelle für Kreuzungspartner genutzt werden kann. Auch bieten Unkrautpflanzen Lebensraum für Nützlinge und tragen damit zur Gesunderhaltung der Kulturpflanzen bei (SPAHILLARI et al., 1999).

Positive Effekte herbizidfrei gehaltener Teilflächen auf die Artenvielfalt von Pflanzen und Tieren sind aus Ackerrandstreifenprogrammen bekannt. RASKIN et al. (1992) wiesen in einem solchen Programm einen Zusammenhang zwischen einer großen Biodiversität und einer geringen Häufigkeit der Herbizidbehandlungen nach. Dieser Effekt bezog sich sowohl auf die Ackerwildkräuter als auch auf die im Feld lebenden Insekten. Eine Zunahme der Populationsdichte einiger bedrohter Unkrautarten, wie z.B. Blauer Gauchheil (*Anagalis foemina*), Sommer-Adonisröschen (*Adonis aestivalis*) oder Feld-Rittersporn (*Consolida regalis*), in den herbizidfrei gehaltenen Feldrändern wurde von SCHUMACHER (1992) beobachtet.

Neben der Unterlassung von Herbizidapplikationen kann auch die Reduzierung der Aufwandmenge zu einer signifikanten Zunahme der Artenzahl und der Individuendichte

auf Ackerflächen führen. ESBJERG (1998) und JENSEN (1998) machten diese Beobachtung in Studien, in denen die Auswirkungen des dänischen Programms zur PSM-Reduzierung abgeschätzt wurde. In einer Untersuchung von DERKSEN et al. (1995) wurde das nicht nachgewiesen. Nach der Durchführung einer Nachauflaufbekämpfung der Unkräuter nahm hier lediglich die Pflanzendichte, nicht aber die Anzahl der Unkrautarten ab.

### 3 Problemstellung und Zielsetzung

Wie aus der Literaturübersicht hervorgeht, bietet die teilschlagspezifische Herbizidapplikation eingebunden in das Konzept des präzisen Pflanzenbaus verschiedene Möglichkeiten, Ressourcen zu schonen. Sie kann daher als Beitrag zu einer nachhaltigeren Landbewirtschaftung gesehen werden.

Die Grundvoraussetzung für die Einführung dieser Technologie in die landwirtschaftliche Praxis ist die technische Umsetzbarkeit des Verfahrens bei vertretbaren Verfahrenskosten. Zusätzlich ist sie abhängig von der Akzeptanz seitens der Landwirte und den politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen.

Die Landwirtschaft ist verpflichtet, sachgerecht und gezielt mit Pflanzenschutzmitteln umzugehen und Risiken für Umwelt, Anwender und Verbraucher zu vermeiden. Die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle stellt zweifelsfrei eine Möglichkeit dar, den Einsatz von Herbiziden einzuschränken und gleichzeitig dem Landwirt Kosten einzusparen. Für die Anwendung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle fehlen geeignete Verfahren zur schnellen und präzisen Erfassung der Unkrautverteilung innerhalb von Ackerschlägen. Ebenso besteht noch Entwicklungsbedarf bei der ortsgenauen Ausbringung von Herbiziden in der gewünschten Dosierung und Mischung. Diese Techniken werden in anderen Projekten entwickelt und es ist zu erwarten, dass in naher Zukunft Systeme zur Unkrauterkennung und Direkteinspeisungssysteme zur punktgenauen Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln zur Verfügung stehen.

Darüber hinaus, und dies ist Ziel dieser Arbeit, fehlt eine ökologische und ökonomische Bewertung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle und eine Anpassung des Konzepts der ökonomischen Schadensschwelle an die Anforderungen der präzisen Unkrautkontrolle. Erst damit kann der Landwirt, auf die Unterschiede innerhalb der Fläche abgestimmt, die richtigen Entscheidungen für die Unkrautkontrolle umsetzen. In die ökonomische Schadensschwelle für die Unkrautkontrolle gehen neben der Dichte und der Art der Verunkrautung auch der zu erwartende Ertrag und die Bodeneigenschaften ein. Präzise Unkrautkontrolle kann daher nur im Zusammenhang mit dem gesamten Präzisionspflanzenbau betrachtet werden und die Wechselwirkungen zwischen der Unkrautverteilung und der Ertragsverteilung sowie der Variation von Bodeneigenschaften und dem Wachstum der Kulturpflanzen müssen berücksichtigt werden. Dies war Ziel der hier vorliegenden Arbeit über eine mehrjährige Studie zur praktischen Anwendung der präzisen Unkrautkontrolle auf Ackerschlägen.

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Versuchsstandort

Die Versuche zur teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle wurden auf dem Versuchsgut Dikopshof der Universität Bonn in Wesseling bei Bonn durchgeführt. Zur Versuchsdurchführung standen in den Jahren 1997 bis 2000 fünf Betriebsschläge zur Verfügung, die mit Ausnahme der Unkrautkontrolle betriebsüblich bewirtschaftet wurden. Die Flächen waren zwischen 2,2 ha und 5,8 ha groß. Vier der Flächen wurden in einer Felderfolge Winterweizen, Wintergerste, Zuckerrübe, Körnermais bestellt. Auf einer Fläche wurde Körnermais in Monokultur angebaut (vgl. Tab. 4.1).

Bei den Böden der Versuchsflächen handelte es sich um lehmigen Sand bis Lehm aus Löß. Das Relief der Flächen war weitgehend flach. Lediglich auf den Schlägen 9 und GH gab es nennenswerte Höhenunterschiede.

Von Schlag 4 standen zusätzlich Daten zur Unkrautverteilung aus den Jahren 1994 und 1995 zur Verfügung. 1995 wurde hier eine teilschlagspezifische Unkrautkontrolle durchgeführt. Auf Schlag 9 wurde 1996 bereits einmal das Unkraut kartiert.

Daten über die Ertragsverteilung wurden in den Jahren 1998 bis 2000 von allen mit dem Mähdrescher zu erntenden Kulturpflanzen des Dikopshofes erfasst.

Tab. 4.1: Größe und Felderfolge der Versuchsflächen

| Schlag | Größe [ha] | 1997         | 1998         | 1999         | 2000         |
|--------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 4*     | 5,5        | Körnermais   | Zuckerrüben  | Winterweizen | Wintergerste |
| 6*     | 5,3        | Zuckerrüben  | Winterweizen | Wintergerste | Körnermais   |
| 8      | 2,4        | Körnermais   | Zuckerrüben  | Winterweizen | Wintergerste |
| 9*     | 5,8        | Wintergerste | Körnermais   | Zuckerrüben  | Winterweizen |
| GH**   | 2,2        | Körnermais   | Körnermais   | Körnermais   | Körnermais   |

\* Schlag wurde ab 1998 in den Versuch aufgenommen

\*\* Schlag wurde ab 1999 in den Versuch aufgenommen

### 4.2 Datenerhebung

#### 4.2.1 Unkrauterfassung im Feld

Die Unkräuter wurden in einem Raster von 15 m (in Bearbeitungsrichtung) \* 7,5 m (quer zur Bearbeitungsrichtung) erfasst. An jedem Kreuzungspunkt des Rasters wurden die Individuen aller vorkommenden Arten auf einer Fläche von 0,4 m<sup>2</sup> gezählt. Die

Erfassung der Unkräuter erfolgte vor und nach jeder Bekämpfungsmaßnahme in allen Versuchsjahren an den selben Zählstellen.

Bei der Getreideernte wurden Nester von über den Bestand herausragenden Unkräutern mit Hilfe des RDS<sup>®</sup>-Ertragsmonitors erfasst und mit dGPS-Koordinaten (geographische Koordinaten im Format WGS 84) versehen gespeichert. Die Pflanzendichte in den Nestern konnte beim Mähdrusch nicht ermittelt werden. Erfasst wurden so Nester der Arten Kletten-Labkraut (*Galium aparine*), Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*) und Acker-Fuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*).

#### 4.2.2 Kartierung der Unkrautverteilung

Aus den Daten der Rasterbonitur wurden mit dem Programm UNPROG (entwickelt am Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau der Universität Bonn) Karten der Unkrautverteilung erstellt. Zwischen den punktbezogenen Daten wurde wie von GERHARDS et al. (1997) beschrieben über eine lineare Triangulation interpoliert, um so für jeden Punkt der Fläche die Unkrautdichte zu schätzen. Die Unkrautdichte wurde in fünf Klassen eingeteilt:  $\leq 1$ ;  $>1 - 5$ ;  $>5 - 10$ ;  $>10 - 25$ ;  $>25$  Pflanzen/m<sup>2</sup>.

Die bei der Ernte mit den zugehörigen dGPS-Koordinaten gespeicherten Daten über die Unkrautverteilung wurden mit Hilfe der Software RDS<sup>®</sup>-Precision-Farming als Karte dargestellt. In diesem Programm wurde aufgrund fehlender Informationen über die Pflanzendichte nicht zwischen den Messpunkten interpoliert, sondern nur der Standort der Unkrautnester dargestellt.

#### 4.2.3 Erfassung der Bodenparameter

Der Humus-, Phosphat- und Kaliumgehalt sowie der pH-Wert wurden aus Bodenproben ermittelt, die in einem Raster von 30 m \* 30 m gezogen wurden. An jedem Schnittpunkt des Rasters wurden mit einem Bohrstock sechs Einstiche bis in eine Tiefe von 30 cm gemacht, aus denen eine Mischprobe erstellt wurde.

Zur weiteren Analyse wurden die luftgetrockneten Bodenproben vermahlen und gesiebt.

Zur Bestimmung des Humusgehalts wurde der Kohlenstoffgehalt der aufbereiteten Bodenproben mit einem C/N-Autoanalyser (Modell NA 1500 der Firma Carlo Erba) gaschromatografisch bestimmt. Die ermittelten C-Gehalte wurden mit dem Faktor 1,724 multipliziert, um den Humusgehalt in % zu erhalten.

Das pflanzenverfügbare Phosphat und Kalium wurde mit der CAL-Methode aus den Bodenproben extrahiert. Die Bestimmung der P- und K-Gehalte erfolgte flammenphotometrisch.

Der pH-Wert der Bodenproben wurde mit einem pH-Meter der Firma WTW® (Modell pH 537) in einer 0,01 molaren Calciumchlorid Lösung gemessen.

#### **4.2.4 Erstellung von Karten über Bodenparameter**

Karten über die Bodenparameter wurden wie die Unkrautverteilungskarten mit dem Programm UNPROG erstellt (vgl. Kap. 4.2.2). Die Klasseneinteilung erfolgte für Kalium und Phosphat entsprechend der Versorgungsstufen. Für den Humusgehalt und pH-Wert orientierte sich die Klasseneinteilung an den ermittelten Werten.

#### **4.2.5 Ertragserfassung**

Getreide und Körnermais wurden mit einem Claas-Dominator Mähdrescher mit 3 m Schnittbreite geerntet, in den nachträglich das Ertragserfassungssystem CERES 2 der Firma RDS® eingebaut wurde (Abb. 4.1). Der Volumenstrom des Erntegutes wird indirekt über eine Lichtschranke im Elevator gemessen. Über die Lichtschranke wird kontinuierlich die Schütthöhe und daraus das Volumen des Erntegutes auf den Paddeln bestimmt. Ein Neigungssensor kann den Einfluss der ungleichförmigen Beladung der Elevatorpaddel am Seitenhang kompensieren. Über das Hektolitergewicht des Erntegutes, welches manuell mit Hilfe einer Balkenwaage ermittelt wird, kann der Massestrom berechnet werden. Aus dem Massestrom kann mit Hilfe der aktuellen Fahrgeschwindigkeit und der Schnittbreite der Flächenertrag quantifiziert werden. Neben dem Ertrag wird über die elektrische Leitfähigkeit des Erntegutes kontinuierlich der Wassergehalt des Korns bestimmt. Über diesen Wert wird der Ertrag auf Standardfeuchte korrigiert. Die Daten werden mit den aktuellen dGPS-Koordinaten auf dem Terminal des Mähdreschers gespeichert.

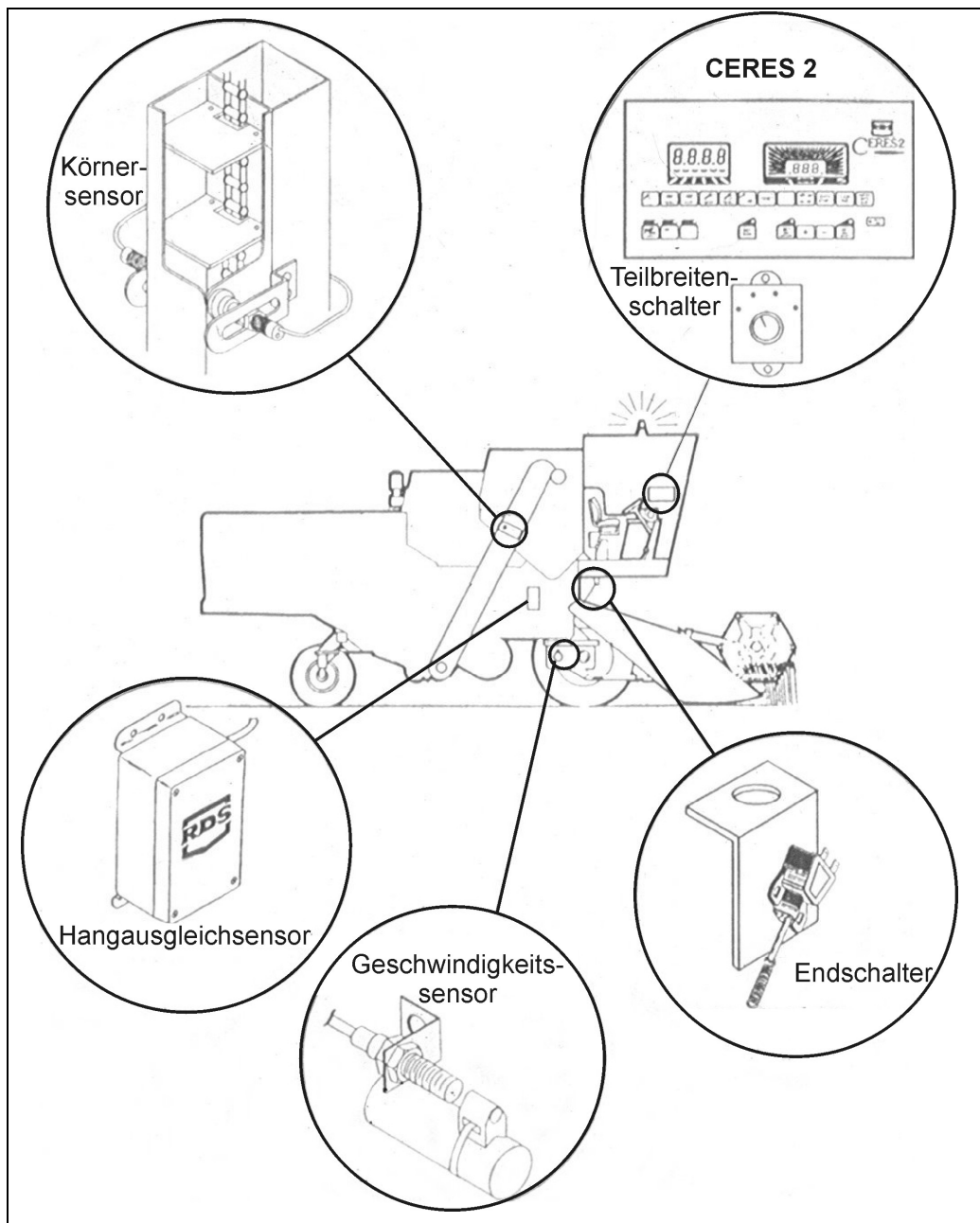


Abb. 4.1: CERES 2 Ertragserfassungs-System der Firma RDS®

## 4.2.6 Zusätzliche Flächeninformationen

### 4.2.6.1 Kartenmaterial

Zur Interpretation der erstellten Unkraut-, Ertrags- und Nährstoffverteilungskarten wurde folgendes Kartenmaterial des Landesvermessungsamtes verwendet:

- Bodenkarten der Reichsbodenschätzung im Maßstab 1:5000
- Topographische Karten mit Höhenlinien im Maßstab 1:5000
- Luftbildkarte vom Mai 1978 im Maßstab 1:5000

Die Bodenkarte und die topographische Karte lagen in analoger Form vor und sind zur weiteren Nutzung im Geo-Informationen-System IDRISI digitalisiert worden. Die Luftbildkarte wurde eingescannt und georeferenziert.

Aus vorangegangenen Untersuchungen lagen für Schlag 4 für die Jahre 1994 und 1995 und für Schlag 9 aus dem Jahr 1996 Unkrautverteilungskarten vor. Die Daten für diese Karten wurden in einem Raster von 15 m \* 15 m erfasst.

#### 4.2.6.2 Ackerschlagkartei

Der Ackerschlagkartei des Dikopshofes wurden die Informationen über die Bewirtschaftungsweise und die Feldhistorie der einzelnen Versuchsfelder entnommen. Insbesondere die Form der vorangegangenen Felderfolge war von Interesse.

### 4.3 Unkrautbekämpfungsmaßnahmen

Zur Unkrautbekämpfung wurde im Versuchszeitraum eine Kombination aus mechanischen und chemischen Maßnahmen durchgeführt. Herbizide wurden teilschlagspezifisch, im Band über der Kulturpflanze oder ganzflächig appliziert. Die Anzahl der Maßnahmen in den verschiedenen Kulturen ist in Tabelle 4.2 aufgezählt.

Tab. 4.2: Anzahl der durchgeführten Unkrautkontrollmaßnahmen gegen dikotyle Unkräuter und Ungräser in den angebauten Kulturen im Versuchszeitraum 1997 bis 2000

| Kultur           | Maßnahme             | Schlag 4 |     | Schlag 6 |     | Schlag 8 |     | Schlag 9 |     | Schlag GH |     |
|------------------|----------------------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|-----------|-----|
|                  |                      | Dik.     | Gr. | Dik.     | Gr. | Dik.     | Gr. | Dik.     | Gr. | Dik.      | Gr. |
| Zucker-<br>rüben | Teilschlag Herbizid  | 1        |     |          |     |          |     | 1        |     |           |     |
|                  | Ganzflächig Herbizid |          |     |          |     | 1        |     |          |     |           |     |
|                  | Bandspritzung+Hacke  | 3        |     |          |     | 4        | 2   | 4        | 1   |           |     |
| Körner-<br>mais  | Teilschlag Herbizid  |          |     | 1        | 1   | 1        | 1   | 1        | 1   |           | 1+1 |
|                  | Ganzflächig Herbizid |          |     |          |     |          |     |          |     | 1+1       |     |
|                  | Hacke                |          |     | 2        |     | 2        |     | 2        |     | 2+2       |     |
| Gerste           | Teilschlag Herbizid  | 1        | 1   | 1        |     | 1        | 1   |          |     |           |     |
| Weizen           | Teilschlag Herbizid  | 1        | 1   | 1        | 1   | 1        | 1   | 1        | 1   |           |     |

Dik. = dikotyle Unkräuter; Gr. = Ungräser



### 4.3.1 Teilschlagspezifische Herbizidapplikation

Die teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung wurde in allen Kulturen im Nachauflaufverfahren offline auf Basis der vorab ermittelten Unkrautverteilungskarten sowie der übrigen Flächeninformationen durchgeführt.

#### 4.3.1.1 Erstellung von Applikationskarten

Die Applikationskarten für die teilschlagspezifische HerbizidAusbringung wurden im Programm UNPROG des Lehrstuhls für Allgemeinen Pflanzenbau (GERHARDS et al., 1997) erstellt. Die Unkrautarten wurden entsprechend ihrer Konkurrenzkraft und Herbizidempfindlichkeit in Gruppen eingeteilt. Für jede der Gruppen wurde Art und Dosis des anzuwendenden Herbizids entsprechend der ökonomischen Schadensschwelle (COBLE und MORTENSEN, 1992) für alle Teilflächen der Versuchsfelder bestimmt.

Im Getreide wurden die drei Unkrautgruppen Ungräser, *Galium aparine* und die übrigen dikotylen Unkräuter gebildet. In Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Unkräuter und der Kulturpflanzen wurde die volle Herbiziddosis (1,0 x) gegen Ungräser bei einer Ungrasdicke von mehr als 50 Pflanzen/m<sup>2</sup> appliziert, 0,8 x wurde auf Teilflächen mit einer Ungrasdicke von mindestens 20-35 Pflanzen/m<sup>2</sup> ausgebracht und bei einer Dichte über 15-20 Pflanzen/m<sup>2</sup> wurde 0,6 x ausgebracht. Für *Galium aparine* lagen diese Schwellenwerte bei 5-10, 0,1-5 und 0,1 Pflanzen/m<sup>2</sup> und für die anderen dikotylen Unkräuter bei 40-60, 30-45, 20 Pflanzen/m<sup>2</sup>.

In Zuckerrüben und Körnermais wurden die Gruppen Ungräser und dikotyle Unkräuter gebildet. Auf eine Herbizidapplikation wurde in beiden Gruppen nur auf Teilflächen verzichtet, die unkrautfrei waren. Auf den übrigen Teilflächen wurde die Herbiziddosis entsprechend der Unkrautdicke variiert. Die niedrige Dosis (0,6 x) wurde gegen Ungräser und dikotyle Unkräuter ab einer Dichte von 1 Pflanze/m<sup>2</sup> appliziert. Die mittlere Dosis (0,8 x) wurde in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Unkrautpflanzen bei einer Dichte von >6-12 Pflanzen/m<sup>2</sup> ausgebracht. Bei einer Unkrautdicke von mehr als 25 bis 50 Pflanzen/m<sup>2</sup> wurde die volle Dosis (1,0 x) verwendet.

#### 4.3.1.2 Umsetzung der Applikationskarten

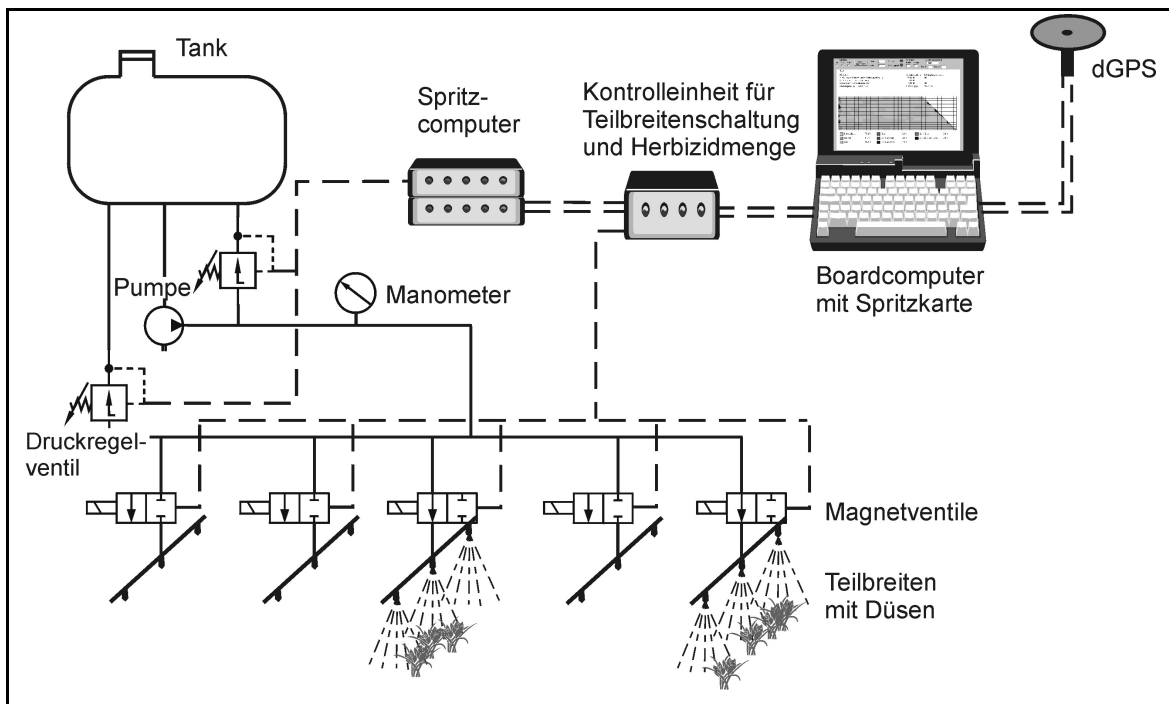


Abb. 4.2: Schema der dGPS-gesteuerten Pflanzenschutzspritze mit separat geschalteten Teilbreiten und Regulierung der Ausbringmenge (GERHARDS et al., 2000)

Die Herbizidapplikation wurde mit einer Feldspritze der Maschinenfabrik RAU (vgl. Abb. 4.2) durchgeführt, die mit einem in fünf Teilbreiten eingeteilten 15 m breiten Spritzgestänge ausgerüstet war. Über eine Kontrolleinheit, die mit dem Spritzcomputer verbunden war, war es mit Magnetventilen möglich, jede Teilbreite separat an- und auszuschalten. Über die gleiche Kontrolleinheit wurde für die gesamte Spritzbreite die Ausbringmenge geregelt. Die Mengenregulierung in drei Abstufungen erfolgte über eine Änderung des Drucks im hydraulischen System der Spritze. Mit den verfügbaren Düsen wurden die Ausbringmengen 240 l/ha, 300 l/ha und 360 l/ha realisiert.

Die Steuerung des Spritzvorganges erfolgte über den an das Spritzsystem angeschlossenen Boardcomputer, auf dem die Spritzkarte gespeichert war. Mit einem dGPS-Empfänger wurde die aktuelle Position des Schleppers bestimmt. Die dazugehörigen Daten aus der Applikationskarte wurden über einen Datenbus an die Kontrolleinheit geleitet, von wo aus die Magnetventile und der Druckregler der Pflanzenschutzspritze angesteuert wurden.

### **4.3.2 Weitere chemische und mechanische Bekämpfungsmaßnahmen**

In Abhängigkeit von der Kulturpflanzenart waren in den Zuckerrüben und dem Körnermais zusätzlich zu der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle noch weitere Bekämpfungsmaßnahmen erforderlich (vgl. Tab. 4.2).

Im Körnermais wurde nach der teilschlagspezifischen Herbizidbehandlung zweimal mit dem Rollkuli gehackt. Beim ersten Durchgang wurde von der Maisreihe weg, in der nächsten Behandlung zur Reihe hin gehackt.

In den Zuckerrüben folgte auf die teilschlagspezifische Herbizidapplikation im frühen Nachauflaufverfahren, in Abhängigkeit vom Unkrautauftreten, zwei- bis dreimal ganzflächig eine mechanische Unkrautbekämpfung mit der Hacke, kombiniert mit einer Bandspritzung über der Kulturpflanzenreihe.

## **4.4 Geo-Informationen-System**

Die Auswertung der ortsbezogenen Daten verschiedener Formate erforderte den Einsatz eines Geo-Informationen-Systems (GIS). Im Programm IDRISI 2.0 (EASTMAN, 1997) war es möglich, sowohl Karten, die sowohl im Raster- als auch im Vektorformat vorlagen, nach einer Georeferenzierung zu verknüpfen und zu analysieren.

Folgende Module des GIS wurden für die Auswertung verwendet:

- RECLASS: Klassifizierung der importierten Karten.
- RESAMPLE: Georeferenzierung der Karten.
- CROSSTAB: zur Bestimmung der Häufigkeit der Herbizidausbringung auf den verschiedenen Teilflächen im Versuchszeitraum.
- AREA: zur Ermittlung der Größe von Flächenanteilen gleicher Klassen.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Ursachen für Ertragsunterschiede auf Ackerschlägen

#### 5.1.1 Genauigkeit des Ertragserfassungssystems CERES 2

Die mit dem System CERES 2 in den Jahren 1998 bis 2000 ermittelten Kornerträge von insgesamt 61 Teilflächen, die eine Gesamtfläche von 80 ha ergaben, wurden mit den auf der geeichten Brückenwaage am Versuchsgut gemessenen Gewichten verglichen und die Abweichungen prozentual berechnet. Die Bestimmtheitsmaße der Beziehungen wurden in einer Regressionsrechnung ermittelt (Tab. 5.1). Die Abweichung der mit dem System CERES 2 berechneten Erträge von den gewogenen Erträgen betrug im Mittel für Weizen und Gerste ca. 4 %, für Mais und Sonnenblumen ca. 5 %, für Hafer und Roggen etwa 8% und für Ackerbohnen ca. 12%. Für alle Teilflächen zusammen betrug sie 5,2 % (Tab. 5.1). Die besten Bestimmtheitsmaße wurden für Gerste, Weizen und Sonnenblumen mit etwa 0,95 ermittelt. Für Roggen und Ackerbohnen wurde ein Bestimmtheitsmaß von etwa 0,74 errechnet. Für Hafer ergab sich das niedrigste Bestimmtheitsmaß mit 0,425. Für alle Fruchtarten gemeinsam lag es bei 0,98.

In Abbildung 5.1 sind die Regressionsgeraden der im Ertragssensor ermittelten Werte und der auf der Hofwaage gemessenen Erntemengen grafisch dargestellt. Die Geraden für Weizen, Gerste und Ackerbohnen sowie die aller Fruchtarten zeigen eine Steigung von etwa 1 und einen Y-Achsenabschnitt, der nahe dem Ursprung liegt. Nur für die Ackerbohnen wird dieser Kurvenverlauf nicht durch ein hohes Bestimmtheitsmaß abgesichert. Die Regressionsgeraden der Fruchtarten Roggen, Hafer und Sonnenblume weisen eine Steigung von etwa 0,5 auf und schneiden die Y-Achse nicht im Bereich des Ursprungs. Für Mais, Roggen, Hafer, Sonnenblumen und Ackerbohnen war die Zahl der Stichproben nicht ausreichend, um zuverlässige Ergebnisse über die Genauigkeit des CERES 2 Ertragsmeßsystems zu liefern.

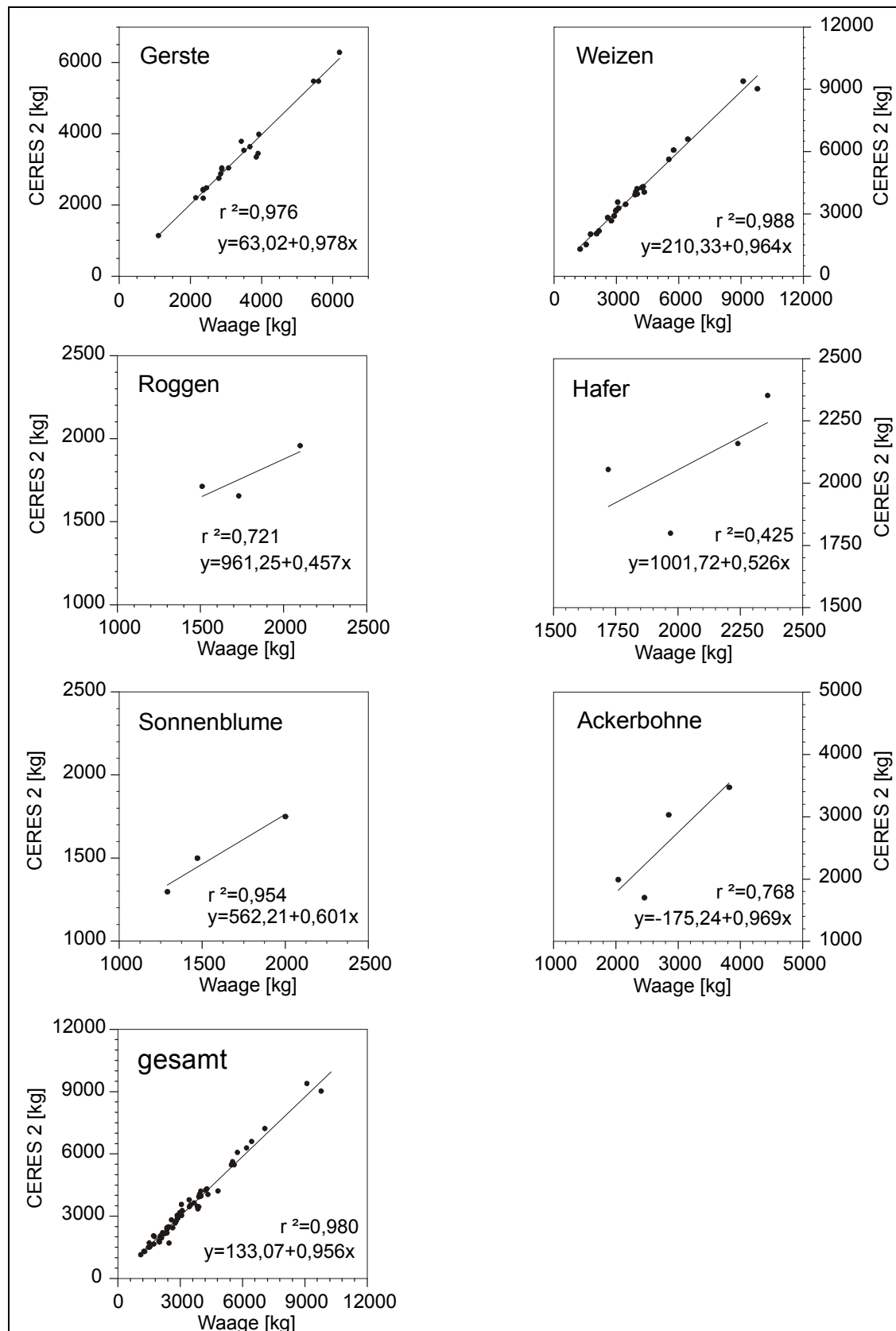


Abb. 5.1: Regressionsgeraden der mit dem Ertragssensor CERES 2 gemessenen Erträge mit den auf der Brückenwaage ermittelten Erntemengen von Gerste, Weizen, Roggen, Hafer, Sonnenblume und Ackerbohne sowie der Kombination aller Messwerte

Tab. 5.1: Vergleich der über das RDS®-Ertragserfassungs-System CERES 2 ermittelten Kornerträge mit den auf der Hofwaage gewogenen Erträgen

| Fruchtart   | Zahl der Proben | Mittleres Gewicht der Proben [kg] | Mittlere Kornfeuchte [%] | Abweichung von den gewogenen Erträgen [%] |      |      | Bestimmtheitsmaß $r^2$ |
|-------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------|---|------|------|------------------------|
|             |                 |                                   |                          | Mittel                                    | Min. | Max. |                        |
| Gerste      | 20              | 3.328                             | 14,0                     | 3,8                                       | 0,3  | 13,0 | 0,976                  |
| Weizen      | 25              | 3.981                             | 13,5                     | 4,4                                       | 0,1  | 16,5 | 0,988                  |
| Mais        | 2               | 2.451                             | 30,0                     | 5,2                                       | 2,7  | 7,7  |                        |
| Sonnenblume | 3               | 1.513                             | 20,5                     | 5,0                                       | 0,5  | 12,5 | 0,954                  |
| Hafer       | 4               | 2.091                             | 12,5                     | 8,0                                       | 0,3  | 19,5 | 0,425                  |
| Roggen      | 3               | 1.774                             | 17,5                     | 8,2                                       | 4,3  | 13,4 | 0,721                  |
| Ackerbohne  | 4               | 2.584                             | 14,5                     | 12,2                                      | 2,5  | 30,9 | 0,768                  |
| gesamt      | 61              | 3.269                             | 15,0                     | 5,2                                       | 0,1  | 30,9 | 0,980                  |

### 5.1.2 Bewirtschaftungshistorie

In der Karte des Winterweizenertrages von 1999 auf Schlag 4 (Abb. 5.2, A) zeigte sich eine Teilung des Feldes in drei Abschnitte, die jeweils ein gleich hohes Ertragsniveau aufwiesen. Im südlichen Teil des Feldes war dabei der Kornertrag am höchsten, im nördlichen am zweithöchsten und im mittleren am niedrigsten. Die Differenz zwischen den Abstufungen betrug ca. 10 dt/ha.

Die Trennlinien zwischen den Teilflächen waren nahezu gerade und entsprachen vormals bestehenden Bewirtschaftungsgrenzen. Genauere Untersuchungen wurden für den nördlichen und mittleren Abschnitt durchgeführt, die in der Folge weiter besprochen werden und die in Abbildung 5.2 C bis G sowie den Unkrautkarten aus Abbildung 5.3 dargestellt sind.

Aus der Karte der ehemaligen Felderfolge, die bereits mehr als zehn Jahre zurück liegt, geht hervor, dass in der nördlichen Hälfte des Feldes mit Zuckerrüben, Winterweizen, Körnermais, Körnermais eine stärker hackfruchtbetonte Rotation durchgeführt wurde als im südlichen Teil mit Zuckerrüben, Kartoffeln, Winterweizen, Sommergerste. Eine derartige Teilung des Schlages in eine nördliche und eine südliche Hälfte ist auch in den Karten der Humus-, Phosphat- und Kaliumgehalte des Bodens zu erkennen.

Die nördliche Hälfte weist dabei die höheren Nährstoff- und Humusgehalte auf. Kalium- und Phosphatgehalte lagen hier mit mehr als 30 mg/100g Boden bzw. 25 mg/100g Boden in der Versorgungsstufe D und E vor. Im Südteil des Feldes betrug der Phosphatgehalt nur 20 bis 30 mg/100g Boden (Versorgungsstufe C und D). Da in beiden Streifen die Versorgung mit Phosphat ausreichend war, ist kein Einfluss der Phosphat-

versorgung auf den Ertrag zu erwarten. Die Kaliumgehalte variierten hier zwischen weniger als 9 mg/100g Boden und 25 mg/100g Boden. Große Bereiche dieses Teilschlags wiesen damit nur die Versorgungsstufen A, B und C auf. Somit könnte hier der niedrige Kaliumgehalt ertragsmindernd gewirkt haben. Die Humusgehalte der nördlichen Hälfte betrugen fast auf der gesamten Teilfläche zwischen 2,0 % und 2,5 %. Im Südteil gab es große Teilflächen auf denen der Humusanteil mit 1,5 % bis 2,0 % deutlich niedriger war.

In der Verteilungskarte des pH-Wertes ist die Teilung nicht zu erkennen. Gleiches gilt auch für die Karte der Reichsbodenschätzung und des Reliefs, die den Schlag bezüglich dieser Merkmale nahezu homogen zeigen.

In den Unkrautverteilungskarten für Feld-Ehrenpreis (*Veronica arvensis*) und Weißen-Gänsefuß (*Chenopodium album*) trat die Trennung in Abhängigkeit von der angebauten Kulturpflanze und dem Jahr unterschiedlich deutlich hervor (vgl. Abb. 5.3). Die höhere Unkrautdichte war in allen Fällen in der Nordhälfte zu finden. Besonders ausgeprägt war die Abgrenzung für *Veronica arvensis* im Winterweizen 1995 und für *Chenopodium album* in den Zuckerrüben 1994 und 1998 zu erkennen.

Eine vergleichbar geradlinige Teilung eines Schlates war in den Unkrautverteilungskarten für *Chenopodium album* auf Schlag 9 zu beobachten (vgl. Abb. 5.8 G,H). Auch dieser Schlag war vormals entlang dieser Linie geteilt und wurde unterschiedlich bewirtschaftet.

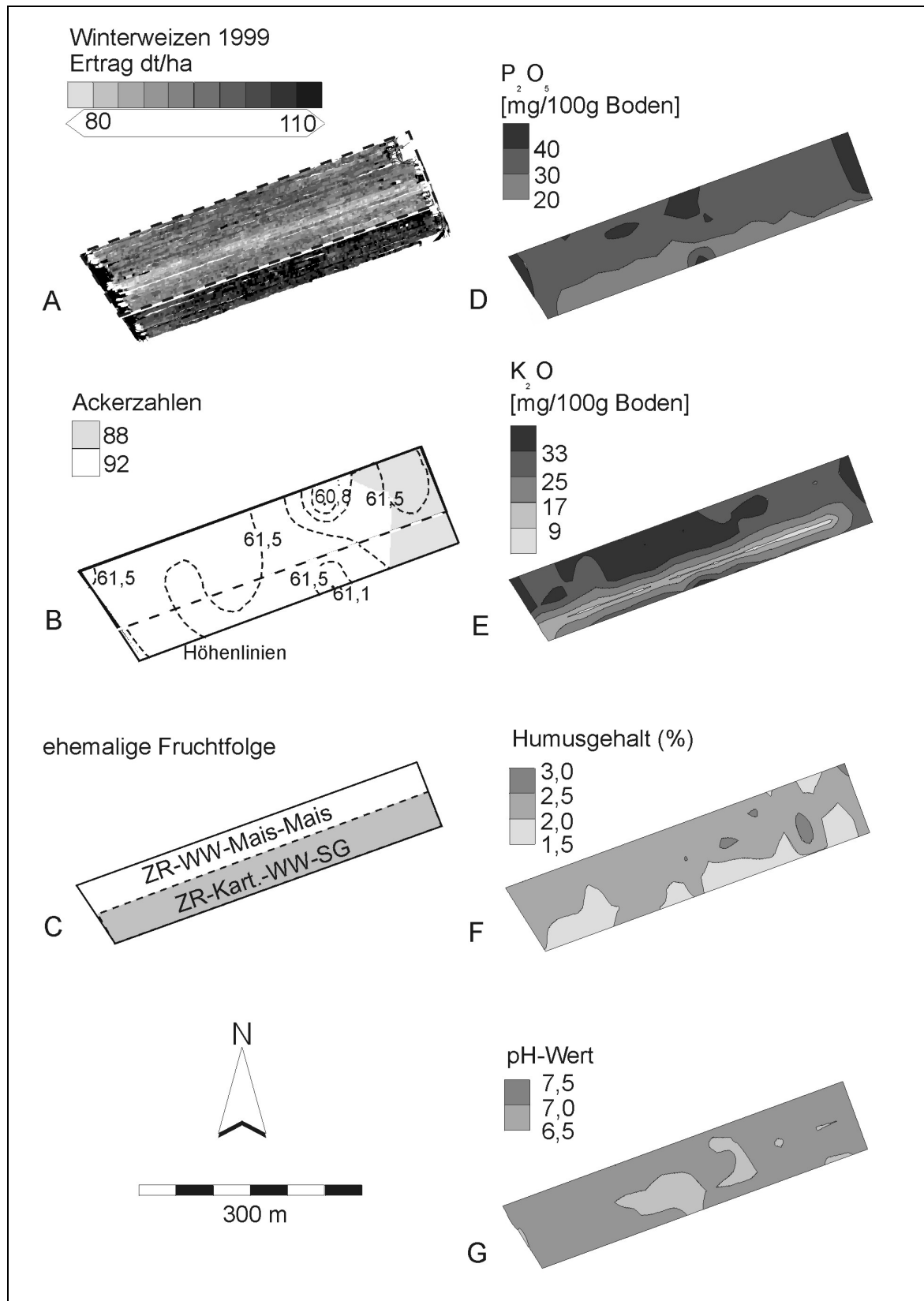


Abb. 5.2: Karten über die Verteilung von Ertrag (A), Ackerzahlen und Höhenlinien (B), Feldhistorie (C), Phosphat-, Kalium- und Humusgehalt (D,E,F) und pH-Wert (G) auf Schlag 4 des Dikopshofes



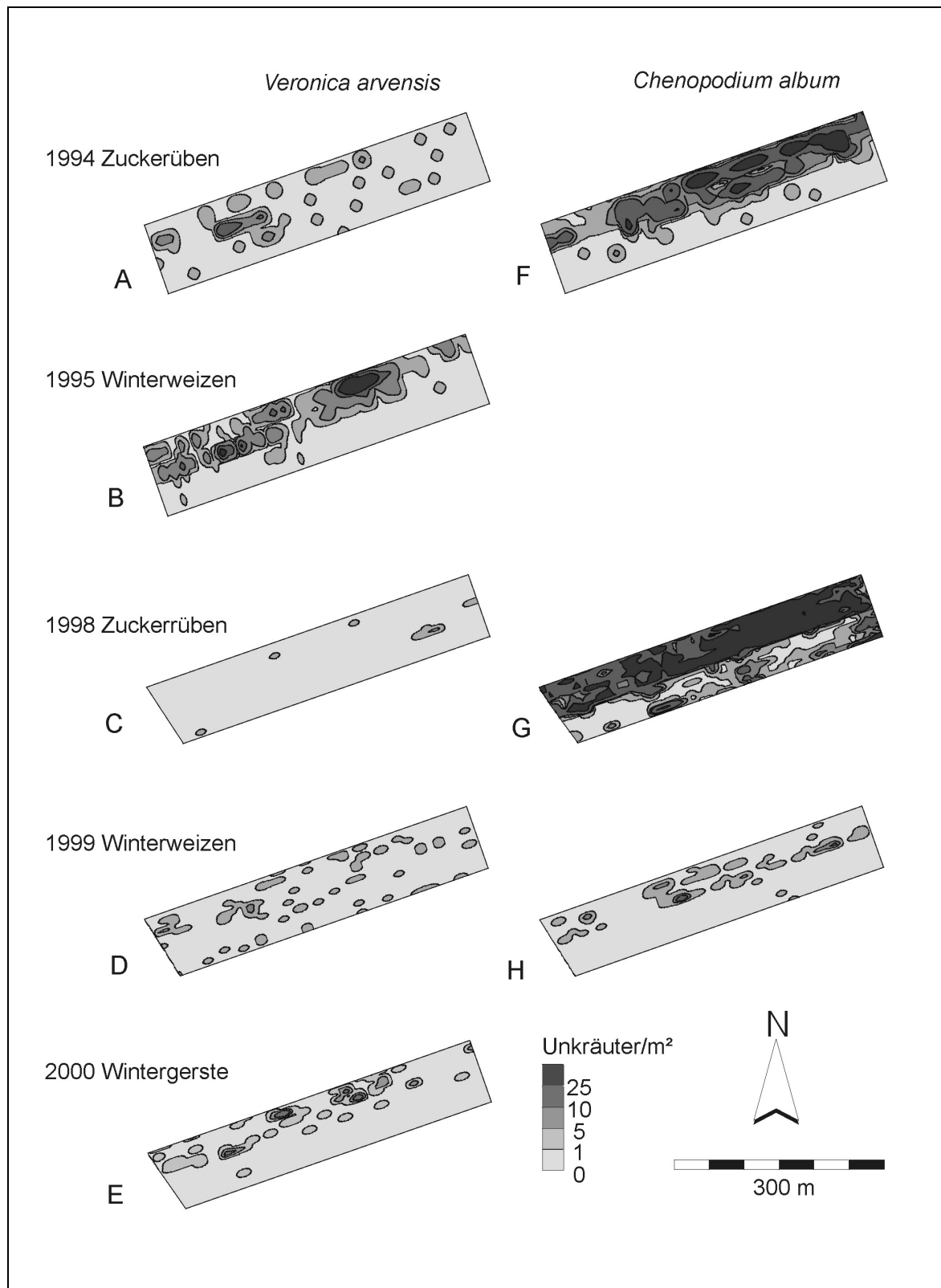


Abb. 5.3 Unkrautverteilungskarten von Feld-Ehrenpreis (*Veronica arvensis*; A-E) und Weißen-Gänsefuß (*Chenopodium album*; F-H) aus den Jahren 1994 und 1995 sowie 1998-2000 auf Schlag 4 des Dikopshofes

### 5.1.3 Bodeneigenschaften und Relief

Deutlichere Ertragsunterschiede als auf Schlag 4 waren innerhalb der Schläge 7, 8 und 9 erkennbar.

Auf Schlag 7 wurde die Ertragskartierung in den Jahren 1998 in Winterweizen und 2000 in Sommerraps durchgeführt (vgl. Abb. 5.4 A,B). Auf diesen Karten ist ein Ertragsrückgang innerhalb des Schlages von nord-west nach süd-ost erkennbar. Im Jahr 2000 kam es dort aufgrund von Trockenschäden im Frühsommer zum völligen Ertragsausfall. 1998 variierte der Ertrag innerhalb des Schlages um mehr als 60 dt/ha, im Jahr 2000 um 45 dt/ha.

Das gleiche Muster wie in den Ertragskarten spiegelt sich auch in der Luftbildkarte vom Mai des Jahres 1978 (Abb. 5.4 D) wider. Helle Bereiche im süd-östlichen Teil des Feldes stehen dunklen Bereichen im nord-westlichen Teil gegenüber.

Auch die Karte der Ackerzahlen und des Reliefs (Abb. 5.4 C) entsprach dieser Schlageinteilung. Zurückgehende Ackerzahlen von 94 auf 52 waren verbunden mit einem Absinken des Reliefs an einem Geländeübergang von 61,5 m auf 57,5 m über NN.

Die Ertragskarten der Jahre 1999 und 2000 von Schlag 8 (Abb. 5.5 A,B) wiesen beide einen in Ost-West-Richtung verlaufenden Streifen auf, in dem die Erntemenge verglichen mit dem übrigen Schlag stark zurückging. Besonders ausgeprägt ist das in der Ertragskarte des Jahres 2000 zu erkennen. In der Zone niedrigen Ertrages wurden unter 50 dt/ha geerntet, während auf dem übrigen Feld meist Erträge von etwa 80 dt/ha erzielt wurden.

Auch für dieses Feld war die Verteilung der erzielten Erntemengen vergleichbar mit der Verteilung der Ackerzahlen und dem Relief des Feldes, wie in Abbildung 5.5 C dargestellt. Das Relief fiel in südlicher Richtung an einer Geländekante um 4,5 m ab. Die Ackerzahlen an diesem Geländeübergang waren mit 42 die niedrigsten auf dem Feld. Hier war auch die Zone des geringsten Ertrages. Mit Ansteigen der Ackerzahlen in beide Richtungen stieg auch das Ertragsniveau.

In Abbildung 5.7 A,B sind die Ertragskarten von Schlag 9 aus den Jahren 1998 im Körnermais und 2000 in Winterweizen dargestellt. Im Körnermais traten Ertragsschwankungen innerhalb des Schlages von mehr als 90 dt/ha auf, in Winterweizen von 40 dt/ha. Ein Bereich niedrigen Ertrages lag am nordöstlichen Rand des Feldes, ein weiterer zog sich von der westlichen Schlaggrenze in östlicher Richtung bis zur Mitte des Schlages. Im Körnermais gab es große Zonen hohen Ertrages; im Winterweizen

konnte nur ein kleiner Bereich, der sich von Nord nach Süd durch das Feld zog, als Höchstertragszone identifiziert werden.

Die Verteilung der Ackerzahlen sowie die Höhenlinien auf Schlag 9 (Abb. 5.7 C) wiesen Übereinstimmungen mit den Ertragskarten auf. Die in Ost-West Richtung verlaufende Zone niedrigen Ertrages war an einer Geländekante zu finden, die durch niedrige Ackerzahlen von 41 bis 56 gekennzeichnet war. Die in der Ertragskarte aus dem Jahr 2000 erkennbare Zone höchsten Ertrages war im Bereich einer Senke im Relief des Feldes mit hohen Ackerzahlen lokalisiert. Im Jahr 1998 wurden die hohen Erträge außerdem in Bereichen des Feldes erzielt, die durch hohe Ackerzahlen gekennzeichnet waren bzw. in denen keine großen Höhendifferenzen feststellbar waren.

Der Vergleich der Ertragskarten sowie der Boden- und Reliefkarten mit Unkrautverteilungskarten der Ungräser (hauptsächlich Acker-Fuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*)) (Abb. 5.8 A,B,C) und von Vogel-Knöterich (*Polygonum aviculare*) (Abb. 5.8 D,E,F) erbrachte Übereinstimmungen. *Polygonum aviculare* kam in hohen Dichten vor allem in den Jahren 1998 und 1999 in den Bereichen niedrigen Ertrages mit schlechter Bodenqualität an den Geländeübergängen vor. Die Verteilung der Ungräser verhielt sich dazu gegensätzlich. *Alopecurus myosuroides* Nester befanden sich im Nordosten des Feldes in Zonen guter Böden und hohen Ertrages. Das Ungrasnest im Westen, das in den Jahren 1999 und 2000 sichtbar wurde, bestand vorwiegend aus Pflanzen der Art Jährige-Rispe (*Poa annua*). Bestätigt wird hier die Aussage von HANF (1990), dass *Alopecurus myosuroides* nährstoffreiche, schwere Böden mit guter Wasserversorgung bevorzugt, während *Polygonum aviculare* geringere Ansprüche an die Bodenqualität stellt und die geringe Konkurrenzkraft der Kulturpflanzen in den Bereichen niedrigen Ertrages ausnutzt, um sich dort zu etablieren.

#### 5.1.4 Unkrautkonkurrenz

Ein Zusammenhang zwischen der Höhe des Ertrags und einer hohen Unkrautdicke konnte für Schlag 8 beobachtet werden. In Abbildung 5.6 ist ein Ungrasstreifen mit einer hohen Dichte von Acker-Fuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) in den Jahren 1997 bis 2000 dargestellt, dessen Position und Ausdehnung sich unter dem Einfluss der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung kaum veränderte. Der Streifen mit *Alopecurus myosuroides* blieb in Lage und Ausdehnung stabil (vgl. Abb. 5.6 A,D,G,K), obwohl in jedem Jahr in dem Bereich eine Ungrasbekämpfung durchgeführt wurde (vgl. Abb. 5.6 B,E,H,L). Die Lücke in dem Herbizidausbringungsstreifen des Jahres 1999 resultierte aus einem weiteren Versuch zu alternativen Bekämpfungsmaßnahmen, der dort vorab durchgeführt wurde. Zu beobachten war, dass die Bekämpfung mit Aus-

nahme des Jahres 1997 nur teilweise erfolgreich war (vgl. Abb. 5.6 C,F,I,M), was dazu führte, dass die Ungräser besonders im Jahr 1999 auch noch zur Ernte zu erkennen waren (vgl. Abb. 5.5 J,N). In den Ertragskarten von Schlag 8 zeigten sich die dadurch hervorgerufenen Ertragsrückgänge (vgl. Abb. 5.5 A,B).

Die Auswirkungen des als Problemunkraut eingestuften Kletten-Labkrauts (*Galium aparine*) auf den Ertrag wurde auf Schlag 6 untersucht. In Abbildung 5.10 sind die Verteilungskarten von *Galium aparine* vor der Herbizidapplikation (A,D,G) und bei der Ernte (C,F) sowie die Herbizidapplikationskarten (B,E) des Versuchszeitraums dargestellt. Es zeigte sich, dass die Bekämpfung auf den Teilflächen, auf denen das Unkraut vor der Herbizidapplikation erkannt wurde, in den Jahren 1998 und 1999 erfolgreich war. Jedoch konnten sich auf unbehandelten Teilflächen Individuen dieser Art etablieren, die bei der Ernte kartiert wurden.

In den Ertragskarten der Jahre 1998 in Winterweizen und 1999 in Wintergerste (vgl. Abb. 5.9 A,B) konnten keine ertragswirksamen Auswirkungen der Verunkrautung mit *Galium aparine* festgestellt werden. Der Ertrag war über die beobachtete Teilfläche relativ homogen. Boden und Relief zeigten keine große Variabilität, wie in Abbildung 5.9 C zu erkennen ist.

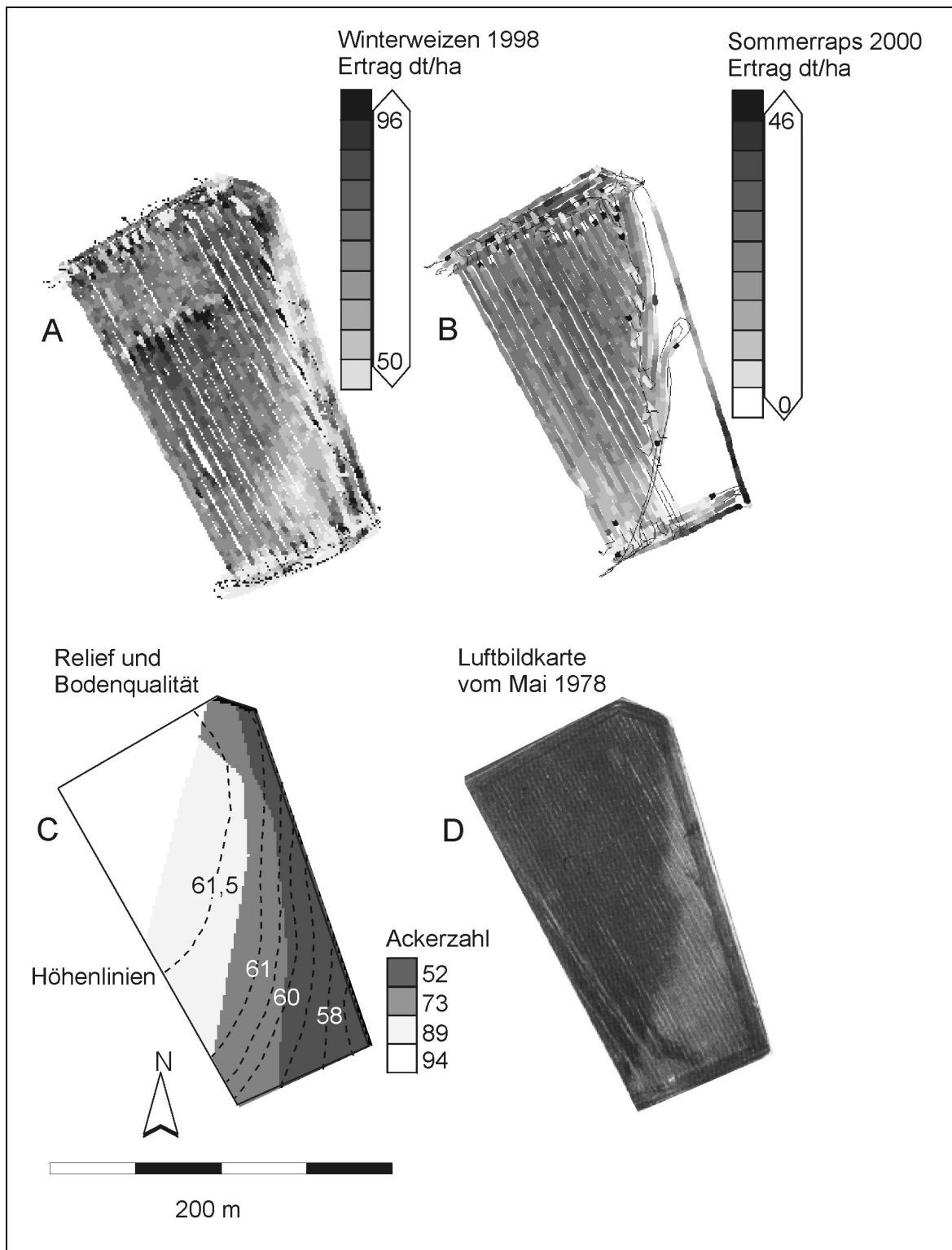


Abb. 5.4: Ertragskarten der Jahre 1998 in Winterweizen (A) und 2000 in Sommerraps (B), Karte der Reichsbodenschätzung und der Höhenlinien (C) sowie Luftbildkarte des Jahres 1978 von Schlag 7 des Dikopshofes

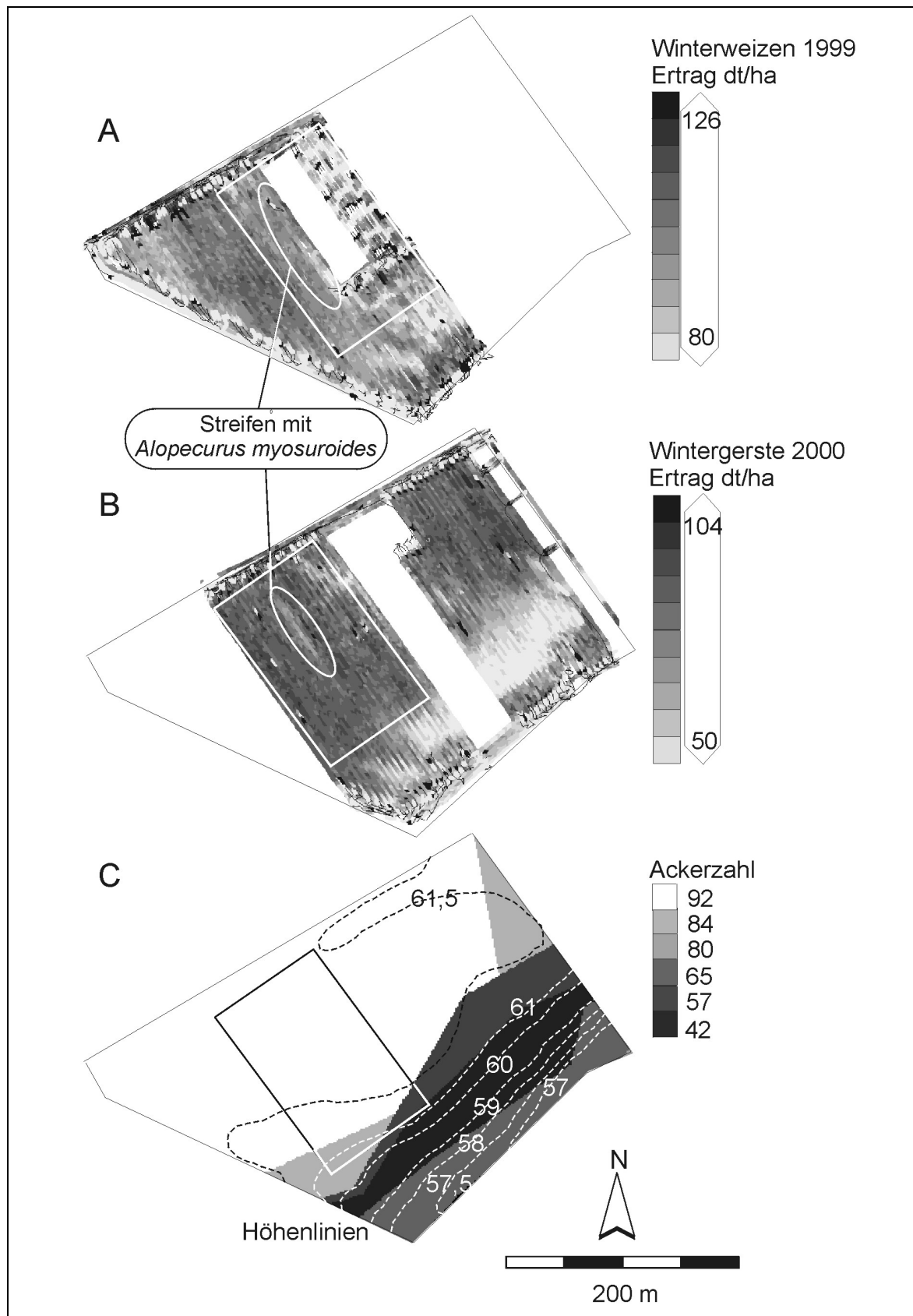


Abb. 5.5: Ertragskarten der Jahre 1999 in Winterweizen (A) und 2000 in Wintergerste (B) sowie Karte der Reichsbodenschätzung mit Höhenlinien (C) von Schlag 8 des Dikopshofes; der Rahmen markiert den Bereich der Unkrautbonitur

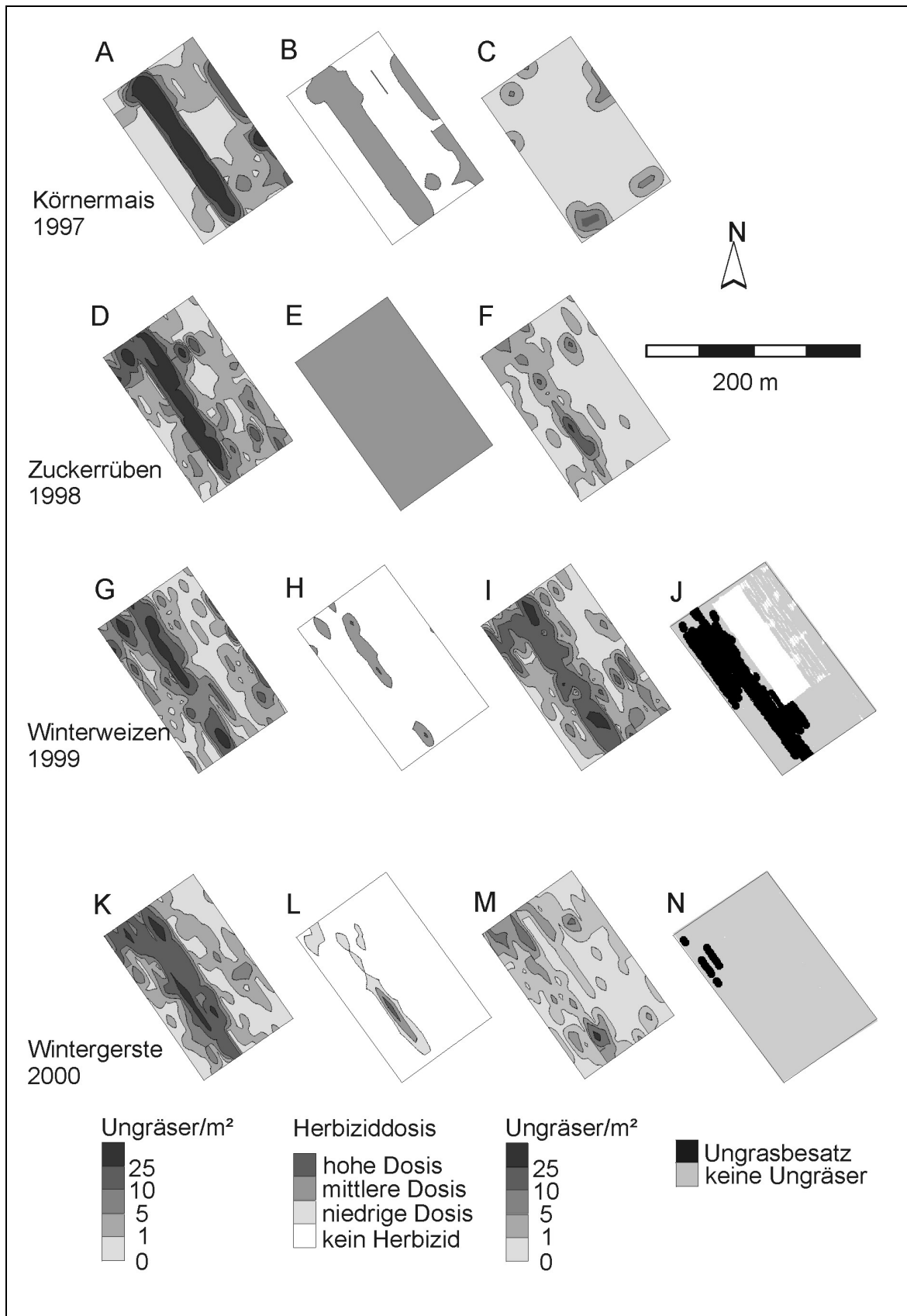


Abb. 5.6: Ungrasverteilungskarten vor der Herbizidapplikation (A,D,G,K), nach der Herbizidapplikation (C,F,I,M) und bei der Ernte (J,N) sowie Herbizidapplikationskarten (B,E,H,L) der Jahre 1997 bis 2000 von Schlag 8 des Dikopshofes

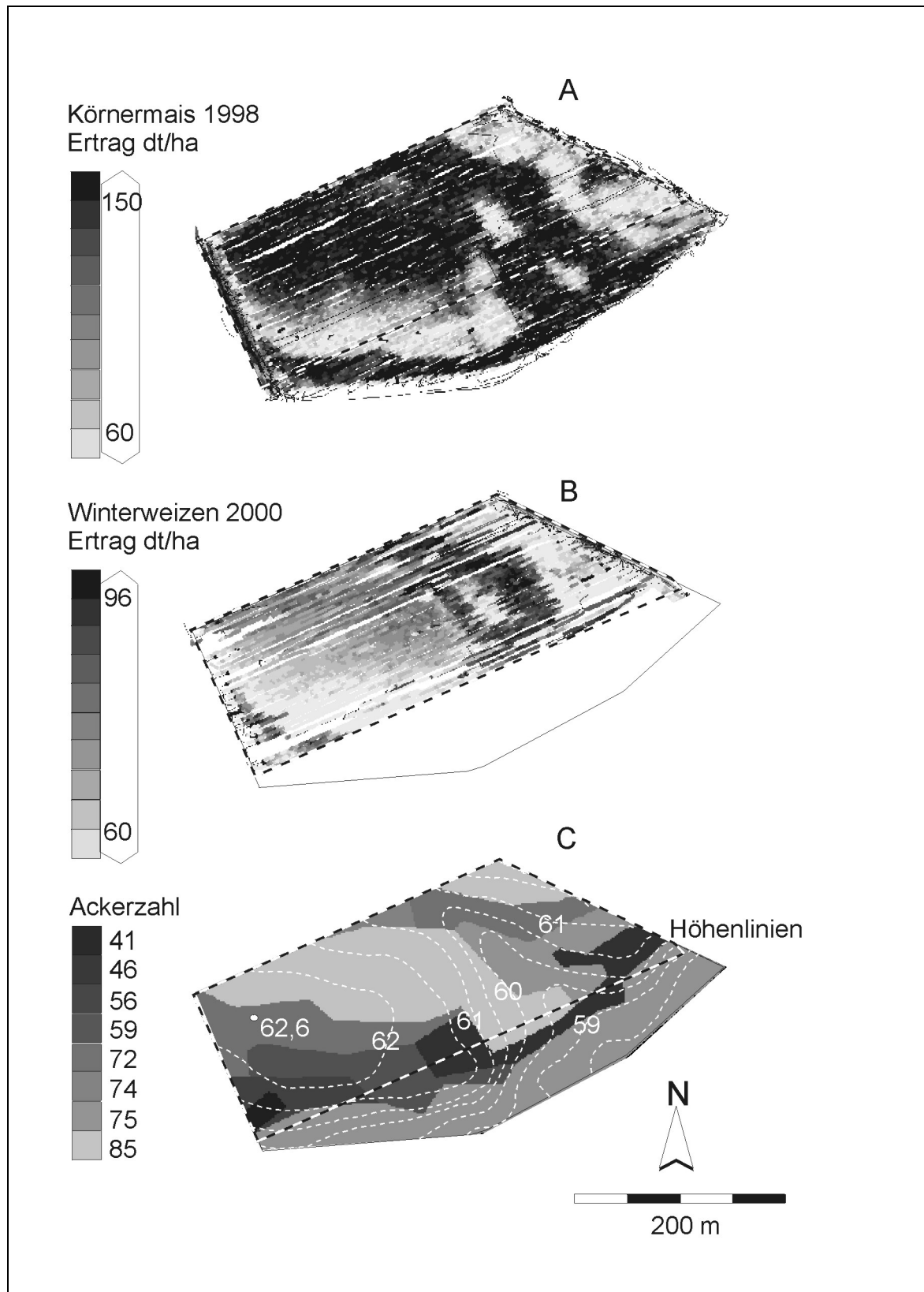


Abb. 5.7: Ertragskarten der Jahre 1998 in Körnermais (A) und 2000 in Winterweizen (B) sowie Karte der Reichsbodenschätzung mit Höhenlinien (C) von Schlag 9 des Dikopshofes; der Rahmen markiert den Bereich der Unkrautbonitur



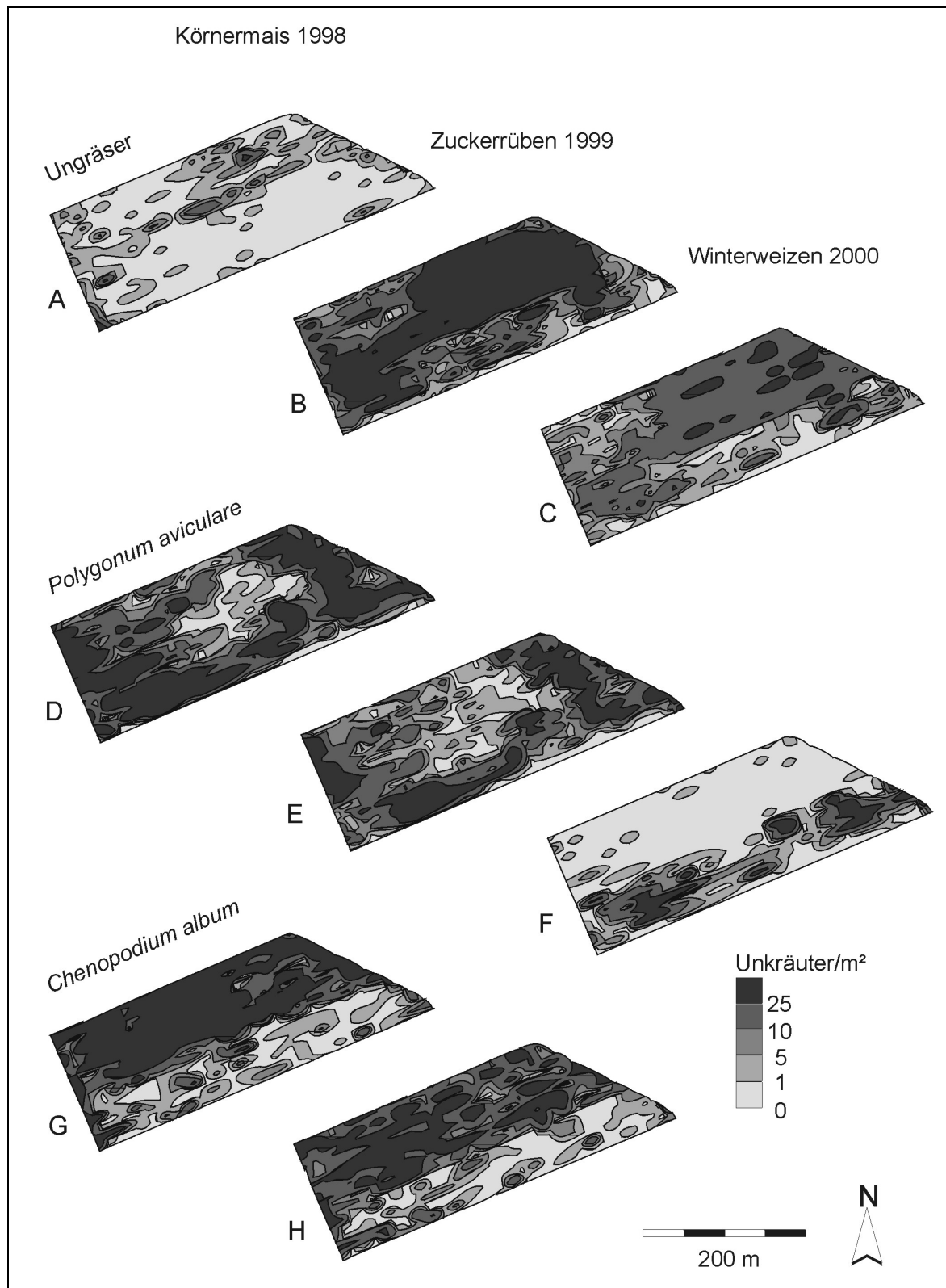


Abb. 5.8: Verteilungskarten der Ungräser (A,B,C), von Vogel-Knöterich (*Polygonum aviculare*) (D,E,F) und Weißen-Gänsefuß (*Chenopodium album*) (G,H) der Jahre 1998-2000 auf Schlag 9 des Dikopshofes

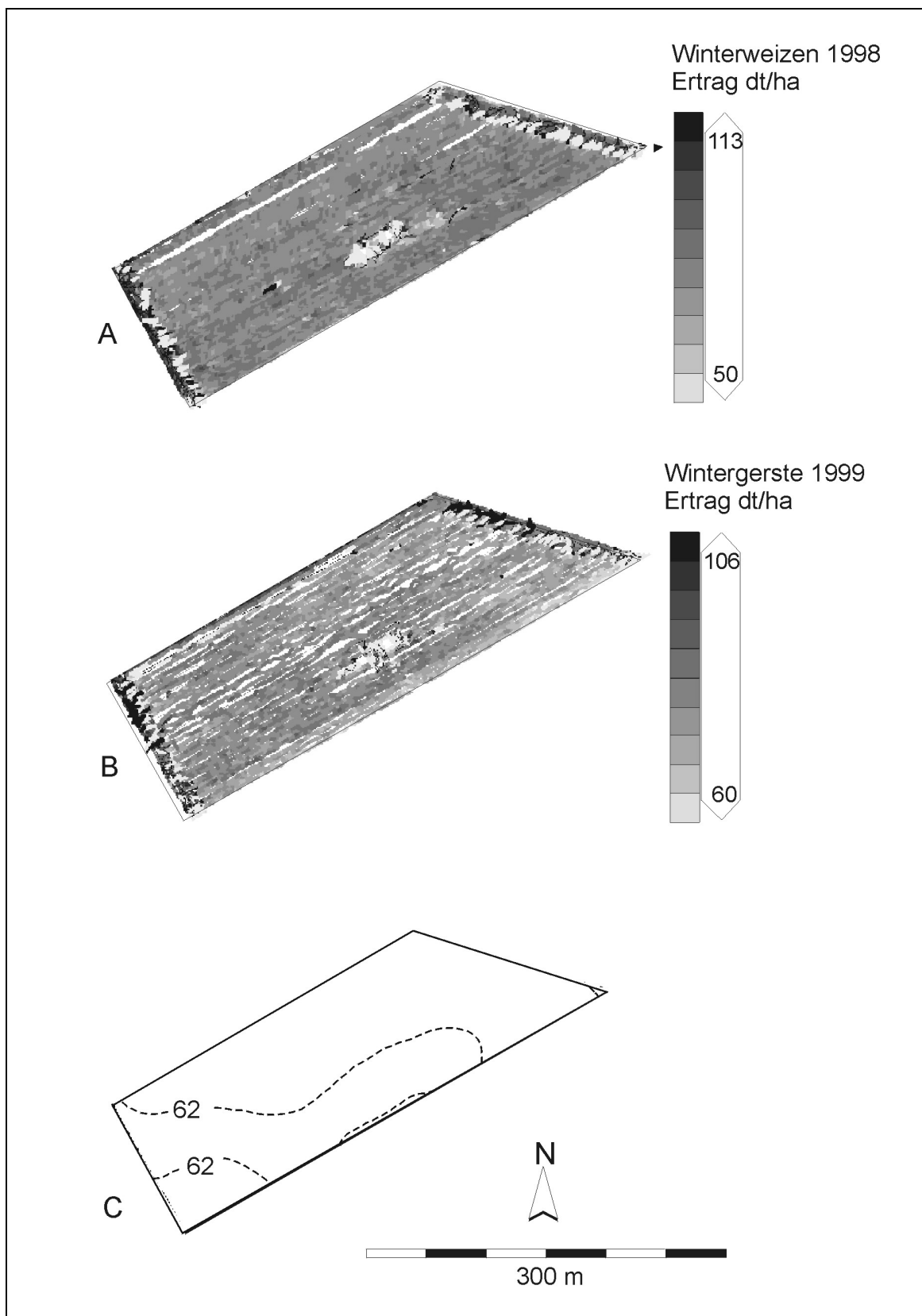


Abb. 5.9: Ertragskarten der Jahre 1998 (A) und 1999 (B) sowie Karte der Höhenlinien (C) von Schlag 6 des Dikopshofes

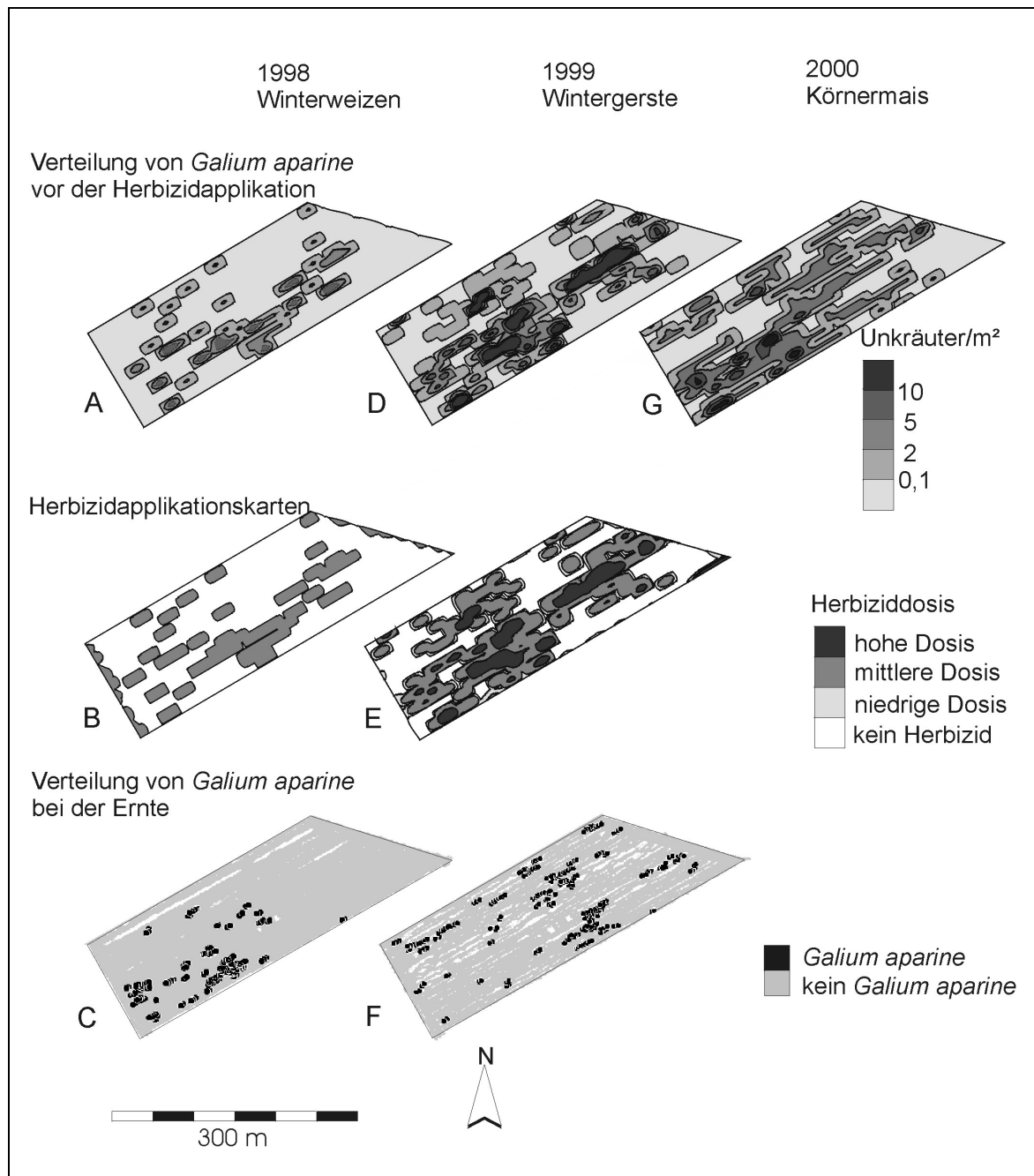


Abb. 5.10: Verteilungskarten von Kletten-Labkraut (*Galium aparine*) vor der Bekämpfung der Jahre 1998 (A), 1999 (D), 2000 (G) und bei der Ernte 1998 (C), 1999 (G) sowie Herbizidapplikationskarten der Jahre 1998 (B), 1999 (E) von Schlag 6 des Dikopshofes

## 5.2 Ökonomischer und ökologischer Nutzen der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung

### 5.2.1 Herbizideinsparung

Die Durchführung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle ermöglichte im Vergleich zur ganzflächigen Herbizidapplikation in allen vier Versuchsjahren eine Reduzierung der ausgebrachten Herbizidmenge. Die Einsparpotenziale an Herbiziden gegen Ungräser bzw. dikotyle Unkräuter variierten sowohl zwischen den Kulturen als auch den einzelnen Versuchsjahren und den Versuchsflächen (vgl. Tab. 5.2).

Tab. 5.2: Flächenanteile der Versuchsflächen, die bei der teilschlagspezifischen Herbizidapplikation in den Jahren 1997-2000 nicht (0,0 x), mit geringer (0,6 x), mittlerer (0,8 x) oder voller Herbiziddosis (1,0 x) behandelt wurden.

|          |        | Flächenanteil [%]  |       |       |       |          |       |       |       |
|----------|--------|--------------------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
|          |        | Dikotyle Unkräuter |       |       |       | Ungräser |       |       |       |
|          | Kultur | 0,0 x              | 0,6 x | 0,8 x | 1,0 x | 0,0 x    | 0,6 x | 0,8 x | 1,0 x |
| Schlag 4 | ZR     | 14                 | 55    | 31    | 0     | 100      | 0     | 0     | 0     |
|          | WW     | 88                 | 3     | 6     | 3     | 96       | 0     | 3     | 1     |
|          | WG     | 84                 | 11    | 4     | 1     | 97       | 1     | 1     | 1     |
| Schlag 6 | WW     | 71                 | 0     | 29    | 0     | 100      | 0     | 0     | 0     |
|          | WG     | 41                 | 12    | 35    | 12    | 87       | 7     | 4     | 2     |
|          | KM     | 10                 | 37    | 49    | 4     | 90       | 5     | 5     | 0     |
| Schlag 8 | KM     | 0                  | 27    | 73    | 0     | 65       | 0     | 35    | 0     |
|          | ZR     | 0                  | 0     | 100   | 0     | 0        | 0     | 100   | 0     |
|          | WW     | 69                 | 17    | 13    | 1     | 92       | 0     | 7     | 1     |
|          | WG     | 50                 | 32    | 10    | 8     | 91       | 8     | 1     | 0     |
| Schlag 9 | KM     | 5                  | 0     | 95    | 0     | 98       | 0     | 2     | 0     |
|          | ZR     | 0                  | 0     | 100   | 0     | 36       | 0     | 64    | 0     |
|          | WW     | 20                 | 21    | 25    | 34    | 65       | 32    | 2     | 1     |
| Schlag   | KM     | 0                  | 0     | 100   | 0     | 55       | 29    | 12    | 3     |
| GH       | KM     | 0                  | 0     | 100   | 0     | 75       | 7     | 10    | 8     |

KM: Körnermais; WG: Wintergerste; WW: Winterweizen; ZR: Zuckerrübe

Die größten Herbizidmengen konnten durch die im Nachauflaufverfahren durchgeführte teilschlagspezifische Applikation im Getreide eingespart werden. Das galt für die Bekämpfung der Ungräser und der dikotylen Unkräuter. Das Modell der ökonomischen Schadensschwelle zugrundelegend, wurde im Getreide ein Flächenanteil von 20 % bis 88 % nicht gegen dikotyle Unkräuter behandelt und zwischen 67 % und 97 % nicht gegen Ungräser. Einsparungen von 97 % bei der Ungrasbekämpfung werfen die Frage

auf, ob ein Landwirt in diesem Falle überhaupt eine Maßnahme durchgeführt hätte oder nur in einer separaten Maßnahme die stark befallenen Randbereiche der Flächen behandelt hätte. Tatsächlich entschied sich der Betriebsleiter aber in jedem Jahr dafür, eine gemeinsame Bekämpfung von Unkräutern und Ungräsern durchzuführen.

Weitere Einsparungen resultierten aus der Anpassung der Herbiziddosis an die Unkrautdichte auf den Teilflächen. Gegen dikotyle Unkräuter wurde auf bis zu 32 % der Fläche die 0,6-fache Herbiziddosis appliziert und auf bis zu 35 % der Fläche die 0,8-fache. Nur maximal 34 % der Fläche wurde auf den untersuchten Feldern mit der vollen Dosis gegen dikotyle Unkräuter behandelt. Auch bei der Bekämpfung der Ungräser konnten so im Getreide im kleineren Umfang weitere Herbizidmengen eingespart werden.

Tab. 5.3: Einsparungen an Herbiziden [%] gegen Ungräser und dikotyle Unkräuter in den Kulturen Körnermais, Zuckerrüben, Winterweizen durch teilschlagspezifische Applikation verglichen mit ganzflächiger Applikation im Versuchszeitraum 1997-2000

|                   |       | Herbizideinsparung [%] |          |          |          |           | $\bar{x}$ Kultur | $s_x$ |
|-------------------|-------|------------------------|----------|----------|----------|-----------|------------------|-------|
| Kultur            |       | Schlag 4               | Schlag 6 | Schlag 8 | Schlag 9 | Schlag GH |                  |       |
| Körner-<br>mais   | Dik.* |                        | 15       | 13       | 5        |           | 11               | 6     |
|                   | Gr.** |                        | 91       | 65       | 98       | 75 60     | 78               | 16    |
| Winter-<br>gerste | Dik.  | 86                     | 41       | 54       |          |           | 60               | 23    |
|                   | Gr.   | 97                     | 88       | 92       |          |           | 92               | 5     |
| Winter-<br>weizen | Dik.  | 88                     | 71       | 72       | 18       |           | 62               | 31    |
|                   | Gr.   | 96                     | 100      | 92       | 70       |           | 89               | 13    |
| Zucker-<br>rüben  | Dik.  | 41                     |          |          |          |           | 41               |       |
|                   | Gr.   |                        |          |          | 36       |           | 36               |       |
| $\bar{x}$ Dik.    |       | 72                     | 42       | 35       | 8        | 0         | 46               | 25    |
| $\bar{x}$ Gr.     |       | 64                     | 89       | 62       | 68       | 68        | 81               | 13    |
| $s_x$ Dik.        |       | 26                     | 28       | 30       | 9        |           | 24               |       |
| $s_x$ Gr.         |       | 1                      | 6        | 16       | 31       | 10        | 26               |       |

\* Herbizide gegen dikotyle Unkräuter, \*\* Herbizide gegen Ungräser

Wie in Tabelle 5.3 angegeben, konnte die Aufwandmenge der Gräserherbizide in Wintergerste im Mittel um 92 % und in Winterweizen um 89 % reduziert werden. Für die Herbizide gegen dikotyle Unkräuter betrugen die Einsparungen 60 % in Wintergerste bzw. 62 % in Winterweizen.

In den Reihenkulturen Körnermais und Zuckerrübe waren die Einsparpotenziale in der Addition beider Herbizidgruppen geringer (vgl. Tab. 5.2 und Tab. 5.3).

Im Körnermais konnten lediglich bei der Bekämpfung der Ungräser die Herbizidmengen verringert werden. Die unbehandelten Flächenanteile umfassten zwischen 55 % und 98 % der Versuchsfelder. Im Durchschnitt wurde eine um 77 % reduzierte Herbizidmenge gegen Ungräser appliziert. Auf Schlag GH konnte durch die Reduzierung der Herbiziddosis auf 41 % der Fläche ein weiterer Einspareffekt verwirklicht werden. Bei der Kontrolle der dikotylen Unkräuter im Körnermais konnte nur auf kleinen Teilflächen, zwischen 5 % und 10 % der Gesamtfläche, auf eine Herbizidapplikation ganz verzichtet werden. Das hing damit zusammen, dass die Bekämpfungsschwelle für Unkräuter im Mais bei 0 Pflanzen/m<sup>2</sup> lag und damit nur die tatsächlich unkrautfreien Teilflächen unbehandelt blieben. Zusammen mit den Einsparungen, die aus der Dosisreduzierung entstanden, konnte im Durchschnitt bei der Kontrolle der dikotylen Unkräuter die Wirkstoffmenge um 11 % reduziert werden.

In den Zuckerrüben konnten aufgrund der niedrigen Schadenschwelle und der relativ hohen Unkrautdichte Ungräser und dikotyle Unkräuter nur jeweils einmal teilschlagspezifisch bekämpft werden. Dabei wurden die Herbizidmenge bei der Bekämpfung der dikotylen Unkräuter um 41 % und der Ungräser um 36 % reduziert. Bei den weiteren Bekämpfungsmaßnahmen wurden die Herbizide auf der gesamten Fläche im Band über den Rübenreihen appliziert. Zusätzlich wurde zwischen den Reihen gehackt.

### **5.2.2 Monetäre Einsparung**

Monetäre Einsparungen beim Einsatz der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung ergaben sich aus dem Umfang der einzusparenden Herbizidmenge im Vergleich zu einer ganzflächigen Applikation. Der Kostenvergleich zwischen teilflächenspezifischer und ganzflächiger Applikation für die Fruchtarten Körnermais, Wintergerste, Winterweizen und Zuckerrüben auf den fünf Versuchsfeldern ist in Tabelle 5.4 dargestellt.

Im Durchschnitt aller Flächen und Fruchtarten betrug die Kostenersparnis, die aus der Reduzierung des Herbizidaufwandes resultierte, 33 €/ha. Zwischen den einzelnen Versuchsfeldern variierte dieser Wert, unabhängig von der Art der Felderfolge, nur wenig zwischen 30 €/ha und 36 €/ha. Größere Differenzen zwischen 20 €/ha und 42 €/ha waren zwischen den einzelnen Fruchtarten festzustellen.

Die höchsten durchschnittlichen Einsparungen wurden im Körnermais mit 42 €/ha realisiert. Auch die absolut höchste in den Versuchen erzielte Ersparnis konnte in dieser Kultur auf Schlag 9 mit 51 €/ha erreicht werden. Die Einsparungen resultierten im Kör-

nermais fast ausschließlich aus der Verringerung des Herbizidaufwandes gegen die Ungräser (vgl. Tab. 5.3). Infolge der hohen Kosten für die eingesetzten Herbizide waren in dieser Kultur auch die Einsparungen höher als im Getreide.

Tab. 5.4: Kosten für Herbizide [€/ha] bei der teilflächenspezifischen Kontrolle (TF) auf den Versuchsflächen verglichen mit ganzflächiger Ausbringung (GF) in den Jahren 1997-2000 in Körnermais, Wintergerste, Winterweizen und Zuckerrüben (aufgrund der Maismonokultur auf Schlag GH liegen zwei Werte für Mais vor)

| Kultur            |       | Herbizidkosten [€/ha] |          |          |          |           | $\bar{x}$ Kultur | $s_x$ |    |
|-------------------|-------|-----------------------|----------|----------|----------|-----------|------------------|-------|----|
|                   |       | Schlag 4              | Schlag 6 | Schlag 8 | Schlag 9 | Schlag GH |                  |       |    |
| Körner-<br>mais   | TF*   |                       | 53       | 80       | 66       | 71        | 31               | 60    | 19 |
|                   | GF**  |                       | 101      | 123      | 117      | 108       | 63               | 102   | 24 |
|                   | GF-TF |                       | 48       | 43       | 51       | 37        | 32               | 42    | 8  |
| Winter-<br>gerste | TF*   | 5                     | 26       | 16       |          |           |                  | 16    | 11 |
|                   | GF**  | 45                    | 40       | 45       |          |           |                  | 43    | 3  |
|                   | GF-TF | 40                    | 14       | 22       |          |           |                  | 25    | 13 |
| Winter-<br>weizen | TF*   | 4                     | 13       | 9        | 40       |           |                  | 17    | 16 |
|                   | GF**  | 40                    | 44       | 40       | 70       |           |                  | 48    | 14 |
|                   | GF-TF | 36                    | 31       | 31       | 30       |           |                  | 32    | 3  |
| Zucker-<br>rüben  | TF*   | 44                    |          |          | 15       |           |                  | 29    | 21 |
|                   | GF**  | 76                    |          |          | 23       |           |                  | 49    | 37 |
|                   | GF-TF | 32                    |          |          | 8        |           |                  | 20    | 16 |
| $\bar{x}$ TF*     |       | 18                    | 31       | 35       | 40       | 51        |                  | 35    | 12 |
| $\bar{x}$ GF**    |       | 54                    | 61       | 69       | 70       | 85        |                  | 68    | 12 |
| $\bar{x}$ GF-TF   |       | 36                    | 31       | 32       | 30       | 34        |                  | 33    | 3  |
| $s_x$ TF*         |       | 23                    | 20       | 39       | 26       |           |                  | 21    | 8  |
| $s_x$ GF**        |       | 19                    | 34       | 47       | 48       |           |                  | 28    | 13 |
| $s_x$ GF-TF       |       | 4                     | 18       | 8        | 21       |           |                  | 9     | 8  |

\* teilflächenspezifische Herbizidapplikation; \*\* ganzflächige Herbizidapplikation

Die Kostendifferenz zwischen teilflächig und ganzflächig ausgebrachten Herbiziden in den Getreidekulturen Wintergerste und Winterweizen betrugen 25 €/ha bzw. 32 €/ha. Zwischen den einzelnen Versuchsflächen gab es in Abhängigkeit vom Grad der Verunkrautung große Unterschiede im Aufwand für die teilschlagspezifisch ausgebrachten Herbizide. In Wintergerste wurden Herbizide im Wert zwischen 5 €/ha und 26 €/ha appliziert, im Winterweizen zwischen 4 €/ha und 40 €/ha. In Wintergerste ergaben sich

aus diesen Unterschieden zwischen den Feldern auch größere Schwankungen in den realisierten Einsparungen, die zwischen 13 €/ha und 40 €/ha lagen. In Winterweizen wurden die Unterschiede durch gleichzeitige Änderungen im Aufwand für die ganzflächige Applikation weitgehend kompensiert, so dass hier die verwirklichten Einsparungen auf den einzelnen Versuchsflächen zwischen 30 €/ha und 36 €/ha betrugen. Der geringste Einsparbetrag war in den Zuckerrüben mit durchschnittlich 20 €/ha zu beobachten. Auf Schlag 4 resultierte die Einsparung von 31 €/ha aus einer teilschlagspezifischen Bekämpfung der dikotylen Unkräuter. Auf Schlag 9 wurden die Kosten bei der Kontrolle der Ungräser um 8 €/ha reduziert.

### **5.2.3 Häufigkeit von chemischen Unkrautkontrollmaßnahmen und ihre räumliche Verteilung**

Die Applikationskarten aller Jahre innerhalb des Versuchszeitraums wurden in einem GIS verknüpft. Dadurch wurde dargestellt, wie oft einzelne Teilflächen während der vier Jahre mit Herbiziden behandelt wurden. Das Ergebnis dieser GIS-Anwendung ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Die Größe der Teilflächen mit unterschiedlich häufigen Herbizidanwendungen wurde im GIS errechnet und ist in Tabelle 5.5 abgebildet.

Bei der getrennten Betrachtung der Behandlungsmaßnahmen gegen Ungräser und dikotyle Unkräuter waren Unterschiede deutlich erkennbar. Bei Anwendung der ökonomischen Schadensschwelle war die Größe der Teilflächen, für die keine Bekämpfung der Ungräser im Versuchszeitraum nötig war, größer als die für die dikotylen Unkräuter.

Gegen Ungräser war in großen Bereichen der Schläge 4 (93,7 %), 6 (83,5 %) und GH (51,2 %) im gesamten Versuchszeitraum keine Kontrollmaßnahme erforderlich. Im Band wurden Herbizide auf Schlag 9 einmal und auf Schlag 8 zweimal appliziert. 40 % bzw. 64 % dieser Schläge waren von keiner weiteren Kontrollmaßnahme betroffen. Nur ein Flächenanteil zwischen 0,7 % (Schlag 4) und 19,4 % (Schlag GH) der Felder wurde in jedem Jahr mit Herbiziden gegen Ungräser behandelt.

Wie aus Abbildung 5.11 hervorgeht, bildeten die unbehandelten oder nur im Band behandelten Teilflächen große zusammenhängende Bereiche der Felder.

Für die dikotylen Unkräuter wurde die ökonomische Schadensschwelle für die teilschlagspezifische Kontrolle öfter und auf größeren Flächenanteilen überschritten. Lediglich auf Schlag 6 wurde eine Teilfläche, die 6,1 % des Feldes umfasste, nie mit Herbiziden gegen dikotyle Unkräuter behandelt. Auf Schlag 4 wurden Herbizide in den



Zuckerrüben dreimal im Band appliziert, auf Schlag 9 viermal. Keine zusätzliche teilschlagspezifische Herbizidapplikation war auf diesen Feldern auf 21,9 % bzw. 3,0 % der Fläche erforderlich; auf einem Anteil von 7,8 % bzw. 78,8 % dieser Felder musste mit der maximalen Anzahl der Maßnahmen behandelt werden. Auf Schlag 8 wurde, zusätzlich zu der zweimaligen teilschlagspezifischen Kontrolle der dikotylen Unkräuter, viermal in den Zuckerrüben ein Herbizid im Band appliziert und im Körnermais einmal ganzflächig. Lediglich im Wintergetreide blieben über zwei Jahre hinweg 45,2 % der Fläche herbizidfrei. Auf Schlag GH wurde in allen Jahren auf der gesamten Fläche die Schadensschwelle übertroffen und ein Herbizid appliziert.

Die kleinen nur teilflächenspezifisch oder im Band gespritzten Bereiche waren bei der Behandlung der dikotylen Unkräuter weniger zusammenhängend als bei der Ungrasbekämpfung.

In der Kombination beider Unkrautgruppen blieb nur auf Schlag 6 eine Teilfläche von 5,7 % über den gesamten Versuchszeitraum frei von Herbiziden. Bandspritzungen wurden als einzige chemische Bekämpfungsmaßnahmen auf 20,1 % bzw. 2,4 % der Fläche von Schlag 4 bzw. Schlag 9 durchgeführt. Nur auf Schlag 8 erfolgte einmal und auf Schlag GH zweimal eine ganzflächige Herbizidapplikation. Auch auf diesen Versuchsflächen war die Anzahl der Bekämpfungsmaßnahmen auf großen Teilflächen deutlich reduziert.

Tab. 5.5: Teilflächen [%] mit unterschiedlich häufiger Behandlung durch Herbizide (im Bandverfahren, ganzflächig, teilschlagspezifisch) über den Versuchszeitraum 1997 - 2000

| Anzahl der Maß-           |    | [%]      |          |          |          |           |
|---------------------------|----|----------|----------|----------|----------|-----------|
| nahmen insgesamt          |    | Schlag 4 | Schlag 6 | Schlag 8 | Schlag 9 | Schlag GH |
| Ungräser                  | 5  |          |          | 2,7      |          |           |
|                           | 4  |          |          | 9,5      | 1,0      |           |
|                           | 3  |          |          | 23,5     | 28,9     |           |
|                           | 2  | 0,7      | 6,3      | 64,3     | 30,4     | 19,4      |
|                           | 1  | 5,6      | 10,2     |          | 39,7     | 29,4      |
|                           | 0  | 93,7     | 83,5     |          |          | 51,2      |
| Unkräuter                 | 7  |          |          | 24,4     |          |           |
|                           | 6  | 7,8      |          | 30,4     | 78,8     |           |
|                           | 5  | 11,7     |          | 45,2     | 18,2     |           |
|                           | 4  | 58,7     |          |          | 3,0      |           |
|                           | 3  | 21,9     | 23,0     |          |          |           |
|                           | 2  |          | 39,4     |          |          | 100,0     |
|                           | 1  |          | 31,5     |          |          |           |
|                           | 0  |          | 6,1      |          |          |           |
| Ungräser und<br>Unkräuter | 12 |          |          | 0,1      |          |           |
|                           | 11 |          |          | 1,3      |          |           |
|                           | 10 |          |          | 8,6      | 0,1      |           |
|                           | 9  |          |          | 14,0     | 25,3     |           |
|                           | 8  | 0,6      |          | 51,4     | 34,3     |           |
|                           | 7  | 0,5      |          | 24,7     | 36,7     |           |
|                           | 6  | 8,2      |          |          | 1,3      |           |
|                           | 5  | 12,3     | 1,5      |          | 2,4      |           |
|                           | 4  | 58,3     | 5,4      |          |          | 19,4      |
|                           | 3  | 20,1     | 24,8     |          |          | 29,4      |
|                           | 2  |          | 36,2     |          |          | 51,2      |
|                           | 1  |          | 26,5     |          |          |           |
|                           | 0  |          | 5,7      |          |          |           |

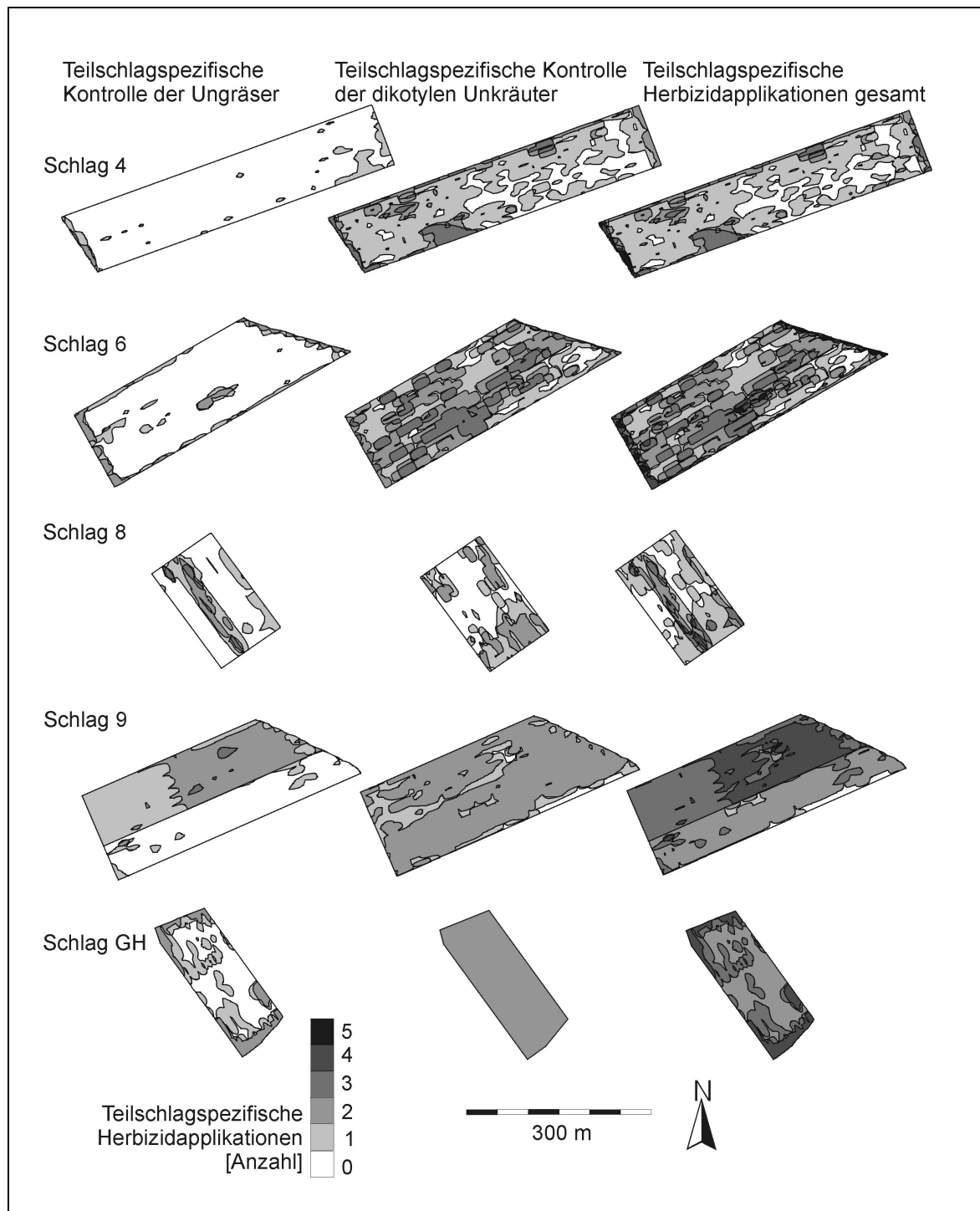


Abb. 5.11: Verknüpfung der Applikationskarten für die teilschlagspezifische Herbizidapplikation der Jahre 1997 - 2000 (hell = selten behandelt; dunkel = häufig behandelt)

## **6 Diskussion und Ausblick**

### **6.1 Bewertung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle im praktischen Einsatz**

Das Verfahren der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle wird in absehbarer Zeit den Schritt vom Versuchsstadium in den praktischen Einsatz auf landwirtschaftlichen Betrieben schaffen. Dazu sind jedoch noch verschiedene Voraussetzungen zu erfüllen. In den folgenden Kapiteln soll, anhand der in dieser Studie erzielten Ergebnisse, diskutiert werden, inwieweit das Verfahren technisch umsetzbar ist, wie der wirtschaftliche Nutzen zu bewerten ist und welche ökologischen Auswirkungen abzuschätzen sind.

#### **6.1.1 Technische Umsetzung**

Die Erfassung der Unkrautverteilung (vgl. Kap. 2.1.1.1 und 2.1.1.2) auf Feldern ist die Voraussetzung für die Durchführung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle. Die Methode der Erfassung muss verschiedene Anforderungen erfüllen:

- Der Wirklichkeit muss in ausreichender Genauigkeit abgebildet werden.
- Der Arbeitsaufwand muss gering sein.
- Das Verfahren muss zuverlässig und automatisierbar sein.

In der vorliegenden Studie wurde die Unkrautkartierung mit Hilfe der Rasterbonitur durchgeführt. Mit dieser Methode haben auch NORDBO et al. (1994), HEISEL et al. (1996a), CLAY et al. (1999) sowie SCHWARZ und WARTENBERG (1999) die Unkrautverteilung kartiert. Inwieweit die Ergebnisse dieser Bonituren ausreichend genau für die Entscheidungsfindung zur teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle sind, ist abhängig von der Dichte der Verunkrautung und von der Höhe der Bekämpfungsschwelle für die jeweilige Unkrautart.

Für die Unkrautarten, die in einer hohen Dichte vorkommen, lieferte die Rasterbonitur ausreichend genaue Ergebnisse. Die mit dieser Methode ermittelten Verteilungsmuster solcher Unkrautarten zeigten über den Versuchszeitraum eine große Ähnlichkeit (vgl. Abb. 5.6 und Abb. 5.8). Diese Ähnlichkeit der Karten verbunden mit dem Wissen um die Stabilität der Unkrautverteilung (WILSON und BRAIN 1991; WALTER 1996), legt den Schluss nahe, dass die Karten die Realität gut darstellten. Auch eine Vergrößerung der Maschenweite des Boniturrasters führte bei HEISEL et al. (1996a) und DAMMER et al. (1999) häufig nicht zu einer anderen Unkrautverteilungskarte. Wichtig war jedoch, dass die Messpunkte eng genug beieinander lagen, damit noch eine statistische Abhängig-

keit zwischen den Werten der benachbarten Messpunkte bestand. Die Kenntnis, bis zu welcher Entfernung der Messpunkte für eine Unkrautart noch eine Abhängigkeit besteht, kann jedoch erst im Nachhinein errechnet werden.

Bei Unkrautarten, die in einer geringen Dichte vorkamen und für die eine niedrige Bekämpfungsschwelle angesetzt wurde, war die ausreichend genaue Erfassung der Unkrautverteilung über die Rasterbonitur problematisch. Für Kletten-Labkraut (*Galium aparine*) galt eine Bekämpfungsschwelle von 0,1 Pflanzen/m<sup>2</sup>. Da sich der untersuchte Bereich lediglich auf 0,4 m<sup>2</sup> an den Rasterpunkten beschränkte, bestand das Risiko, Feldsektoren fälschlich als klettenlabkrautfrei zu klassifizieren, die eigentlich einer Herbizidapplikation bedurften. In der vorliegenden Studie führte das dazu, dass einzelne Individuen von Kletten-Labkraut im Wintergetreide nicht erfasst wurden (vgl. Kap 5.1.4).

Um die Ergebnisse der Rasterbonitur zu verifizieren, wurde auf Feld 6 im Herbst 1998 in Wintergerste ein alternatives Kartierungsverfahren durchgeführt. Das Feld wurde dazu in rechteckige Teilflächen mit einer Größe von 3 m \* 15 m aufgeteilt, die einzeln auf das Vorkommen von Kletten-Labkraut untersucht wurden. Die Unkrautdichte blieb unberücksichtigt. Der Vergleich der beiden Karten (Abb. 6.1) zeigte Übereinstimmungen in der Lage der stark verunkrauteten Teilflächen. Die durch die Verschneidung der beiden Karten erkennbaren Abweichungen der Kartierungsergebnisse legen aber auch den Schluss nahe, dass keines der Verfahren die Wirklichkeit exakt genug abbildete. Diese Problematik wurde auch von HÄUSLER et al. (1998) erkannt. Hier wurde dem dadurch begegnet, dass ein größerer Bereich von 4 m<sup>2</sup> - 6 m<sup>2</sup> um jede Zählstelle auf *Galium aparine* untersucht wurde. Eine Überprüfung der Ergebnisse fand in diesem Versuch jedoch nicht statt.

Eine Möglichkeit, mit den momentan verfügbaren Mitteln, die fehlenden Informationen zur Erstellung von Applikationskarten gegen *Galium aparine* zu erlangen, stellen Verteilungskarten vergangener Jahre und zur Ernte dar. Man setzt dabei eine Ortstreue der Unkräuter voraus. Unkräuter mit schweren Samen, die bereits vor der Ernte ausfallen, sind in der Regel ortsstabil. Im Falle von *Galium aparine* ist das nur teilweise gegeben. Bei der Ernte noch nicht ausgefallene Samen werden über den Mähdrescher verschleppt.

Eine Lösung des Problems solche Unkräuter wie *Galium aparine* zu erfassen, ist durch automatisierte Techniken zur Unkrautkartierung zu erwarten. SÖKEFELD et al. (2000) beschreiben ein Online-System zur bildanalytischen Unkrauterkenntnis mit einem 3-Kamerasystem. Die Kameras sind am Spritzbalken des Schleppers im Abstand von

3 m quer zur Fahrtrichtung angebracht. Jeder Bildausschnitt beträgt 0,4 m \* 0,4 m und die Auswertung der drei Bilder dauert mit einem 500 MHz Boardcomputer ca. 1 Sekunde. Die Bilder werden online auf dem Boardcomputer verrechnet, indem zunächst aus den Grauwertbildern Binärbilder erzeugt und anschließend die Konturen der Pflanzen extrahiert werden. Von den Konturen der Pflanzen werden geometrische Parameter, wie z.B. die Kompaktheit, die minimale und maximale Spannweite sowie Fourierdeskriptoren berechnet. Die Artenerkennung geschieht über einen wissensbasierten Vergleich dieser Merkmale mit in einer Wissensbasis gespeicherten Parametern von repräsentativen Individuen der zu erkennenden Unkraut- und Kulturpflanzen. Die Aufnahmen werden in diesem System im Abstand von wenigen Metern gemacht. Die Anzahl der Boniturstellen und der untersuchte Flächenanteil ist daher wesentlich größer als bei der Rasterbonitur. Dadurch sind genauere Ergebnisse zu erwarten.

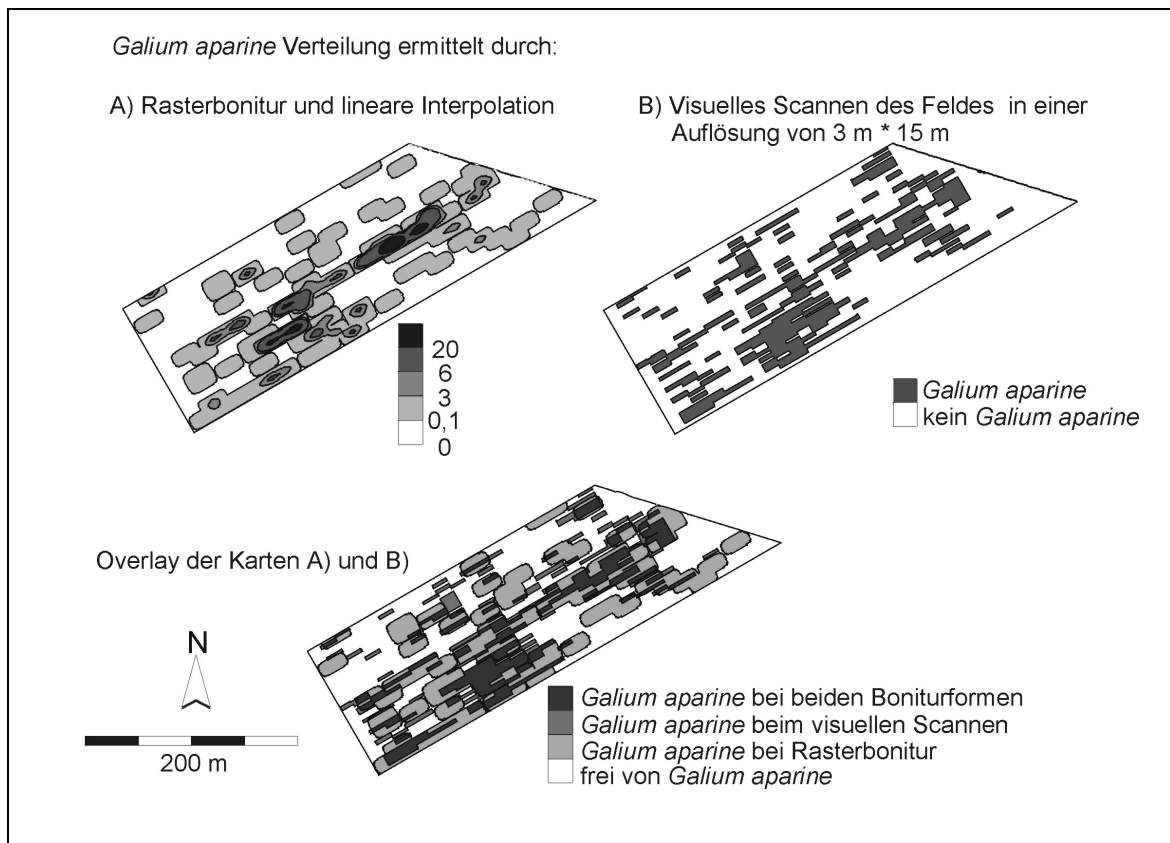


Abb. 6.1: Verteilungskarten von *Galium aparine* in Wintergerste im Herbst 1998 ermittelt über Rasterbonitur mit linearer Interpolation und durch visuelles Scannen des Feldes sowie die Verschneidung der beiden Verteilungskarten

Der Arbeitsaufwand für eine manuelle Kartierung der Unkrautpopulationen auf Ackerschlägen ist viel zu hoch, um in der praktischen Landwirtschaft verwirklicht zu werden.

Neben der Zeit für die Zählung der Unkräuter auf dem Feld, die von NORDBO et al. (1994) und SCHWARZ und WARTENBERG (1999) mit bis zu 4,5 h/ha angegeben wird, ist auch noch der Zeitaufwand zu berücksichtigen, der zur Aufbereitung der erfassten Daten nötig ist. In der vorliegenden Studie dauerte es in Abhängigkeit von der Größe des Feldes und der Dichte der Verunkrautung in der Regel mindestens einen ganzen Arbeitstag, die Applikationskarte zu erstellen.

Solange die Systeme zur automatischen Unkrauterkenennung noch in der Entwicklung sind, müssen daher Möglichkeiten gefunden werden, den Arbeitsaufwand für die Erstellung von Applikationskarten zu verringern. Hilfreich kann es hierbei sein, das zu untersuchende Feld anhand bereits vorliegender Informationen in Zonen aufzuteilen, in denen eine gleiches Unkrautvorkommen zu erwarten ist. Diese Zonen sind dann gezielt auf die aktuelle Unkrautdichte zu untersuchen. Die Einteilung der Felder könnte einerseits anhand von Unkrautkarten der Vorjahre erfolgen. Als weitere Möglichkeit zur Unterteilung des Feldes bieten sich Bodenkarten an, mit deren Hilfe sich Teilflächen mit unterschiedlichen Unkrautartenzusammensetzungen voneinander abgrenzen lassen. Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Vogel-Knöterich (*Polygonum aviculare*) und Acker-Fuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) und der Bodenqualität zeigten sich auf Schlag 9 des Dikopshofes. Ähnliche Befunde konnten NORDMEYER und DUNKER (1999) für die Unkrautarten Acker-Fuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*), Jährige-Rispe (*Poa annua*) und Acker-Stiefmütterchen (*Viola arvensis*) ermitteln.

Vorteilhaft für die Umsetzung der teilflächenspezifischen Herbizidausbringung ist, dass bei modernen Pflanzenschutzspritzen die Ausbringmenge elektronisch geregelt werden kann, und dass die Teilbreiten der Spritze über schnell reagierende Ventile auf- und zugeschaltet werden können. Zur Ausnutzung des gesamten Einsparpotenzials, das bei der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung möglich ist, sind jedoch noch weitere Anpassungen nötig. Dazu zählen die Regulierung der Herbizidmenge in einem Umfang von ca. 30 % bis 100 % der Ausbringmenge, die separate Ansteuerung der einzelnen Teilbreiten sowie die Möglichkeit, die ausgebrachte Wirkstoffkombination während des Spritzvorgangs zu wechseln.

Für die hier vorliegende Arbeit wurde eine separate Steuerung aller fünf Teilbreiten realisiert. Dadurch konnten Teilflächen bei der Herbizidausbringung ausgespart werden, weil bekämpfungswürdige Unkrautnester häufig kleiner waren als die gesamte Arbeitsbreite der Feldspritze.

Wie bei CHRISTENSEN et al. (1996) konnte auch in den hier dargestellten Versuchen zur teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle die Herbiziddosis während der Überfahrt nur in einem Bereich von +/- 20 % reguliert werden, um die Aufwandmenge an die wechseln-

den Unkrautdichten und -arten anzupassen. Eine Anpassung der Herbizidmenge in einem größeren Bereich war mit der vorhandenen Düsentechnik nicht zu realisieren. Es zeigte sich, dass diese Anpassung der Herbizidrate an die Unkrautdichte sinnvoll war, da in Abhängigkeit von Art und Größe der Unkräuter durchaus gute Bekämpfungserfolge mit einer verminderten Herbizidmenge erzielt wurden. Aus dem von WARTENBERG (2000) beschriebenen *Dosis-Wirkungsprinzip* geht hervor, dass es unter günstigen Witterungsbedingungen durchaus möglich wäre, insbesondere weniger konkurrenzstarke oder gegen das eingesetzte Herbizid besonders empfindliche Unkräuter mit noch geringeren Herbizidmengen zu behandeln, um damit zwar nicht die gesamte Blattmasse der Unkräuter abzutöten, aber zumindest die Bildung fertiler Unkrautsamen zu verhindern. Zur Anwendung dieses Prinzips sind weitere Studien nötig, in denen für die Unkrautarten in den verschiedenen Entwicklungsstadien die erforderlich minimale Wirkstoffmenge ermittelt wird.

Der Wirkstoffwechsel zur getrennten Bekämpfung der Ungräser und der dikotylen Unkräuter wäre zur Optimierung des Applikationsverfahrens notwendig, da die zu behandelnden Teilflächen dieser Pflanzengruppen selten an den gleichen Stellen im Feld zu finden waren. Der Einsatz einer Wirkstoffkombination in einer Tankfüllung, die gegen Ungräser und dikotyle Unkräuter gleichzeitig wirksam ist, hätte in den vorliegenden Versuchen dazu geführt, dass große Feldabschnitte unnötig mit herbiziden Wirkstoffen behandelt worden wären (vgl. Abb. 5.11). Auf einigen der in dieser Arbeit untersuchten Feldern hätte ohne einen Wirkstoffwechsel keine teilflächenspezifische Unkrautkontrolle durchgeführt werden können. In der vorliegenden Studie wurde der Wirkstoffwechsel dadurch realisiert, dass die Herbizidbehandlung in zwei getrennten Überfahrten ausgeführt wurde. Verbunden war diese Praxis der Herbizidapplikation mit einem erhöhten Aufwand an Zeit und Energie, der in der landwirtschaftlichen Praxis nicht vertretbar ist.

Für einen Wechsel des Wirkstoffes während der Fahrt gibt es verschiedene Lösungsansätze wie z.B. die Direkteinspritzung von Herbiziden oder eine Feldspritze mit mehreren Applikationssystemen wie sie im Versuchswesen teilweise verwendet werden, die AUDENAERT (2000) zusammengefasst hat (vgl. Kap.2.1.1.4). Fertige Systeme zur Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln an jeder Düse oder Teilbreite gibt es derzeit nicht. Funktionieren können solche Systeme nur, wenn die Pflanzenschutzmittel gleiche physikalische Eigenschaften hinsichtlich Löslichkeit und Viskosität aufweisen. Neben dem Wirkstoffwechsel kann mit Direkteinspeisungssystemen auch das Problem der Restmengen im Spritzmitteltank nach einer Kontrollmaßnahme gelöst werden. Bei der teilflächenspezifischen Herbizidapplikation ist dieses Problem größer als bei der



ganzflächigen Unkrautkontrolle, da im Online-Verfahren eine Berechnung der benötigten Spritzmittelmenge nicht möglich ist.

### 6.1.2 Ökonomische Bewertung

Die anhand dieser Studie durchführbare ökonomische Bewertung der teilflächenspezifischen Herbizidapplikation beschränkt sich auf die möglichen Einspareffekte an Herbiziden. Diese Einsparungen liefern den finanziellen Spielraum, der für die technische Umsetzung der teilschlagspezifische Unkrautkontrolle und die Informationsverarbeitung erforderlich ist. Die Höhe der nötigen Investitionen ist noch nicht bekannt, da insbesondere die Technik zur Unkrauterkennung noch nicht praxisreif ist. Deshalb ist eine abschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens nur begrenzt möglich.

Die Herbizideinsparungen lagen mit in den auf dem Dikopshof durchgeführten Versuchen durchschnittlich bei 65 %. Die Bekämpfungsschwellen waren in den Hackfruchtkulturen deutlich niedriger als in den Getreidekulturen. Deshalb waren die Mitteleinsparungen in den Getreidekulturen mit 76 % höher als in den Hackfrüchten mit 50 %. Die in der Literatur zu findenden Einsparpotenziale haben zum Teil vergleichbare Umfänge (vgl. Tab. 2.2). Die Einsparungen, die im Getreide erzielt wurden, sind vergleichbar mit den Einsparungen von 68 % bis 80 %, die von CHRISTENSEN et al. (1996) und NORDMEYER et al. (1997) in Wintergetreide realisiert wurden, und höher als der Wert von 40 % bis 66 %, den GERHARDS et al. (1997) und HEISEL et al. (1997) ermittelten. In Mais wurde von MEDLIN und SHAW (2000) mit bis zu 84 % eine wesentlich höhere Mitteleinsparung als in der vorliegenden Arbeit realisiert. Dagegen wurden von TIAN et al. (1999) in Reihenkulturen mit 48 % weniger Herbizide eingespart als in dieser Studie.

Verschiedene Faktoren kommen als Begründung für die unterschiedlichen Ergebnisse in Frage. Die Erfassung der Unkrautpopulationen und die Durchführung der Kontrollmaßnahmen haben einen Einfluss auf die Höhe der zu erzielenden Einsparungen. Unterschiedliche Kartierungskonzepte führen zu unterschiedlichen Ergebnissen (vgl. Kap. 6.1.1), was auch das Einsparungspotenzial verändert. Die Art der Schwellenwertsetzung für die Bekämpfung beeinflusst zusätzlich die Größe der zu behandelnden Teilflächen. Zudem ist die Zusammensetzung und die Dichte von Unkrautpopulationen von einer Vielzahl von Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren abhängig (CHANCELLOR, 1985; ANDREASEN et al., 1991; DERKSEN et al., 1993). Die Möglichkeit Herbizide einzusparen, wird dadurch in einem großen Maße beeinflusst.

In der vorliegenden Studie waren Einsparungen teilweise erst dadurch möglich, dass die Herbizide gegen dikotyle Unkräuter und Ungräser separat ausgebracht wurden.

Ohne diese Praxis wäre die Reduzierung der Herbizidmenge deutlich niedriger gewesen.

Für die ökonomische Bewertung ist die monetäre Einsparung ausschlaggebend, die sich aus dem Herbizidpreis multipliziert mit der prozentualen Mitteleinsparung ergibt. Es zeigte sich bei der monetären Bewertung in Übereinstimmung mit LETTNER et al. (2001), dass eine teilschlagspezifische Behandlungsmaßnahme umso lohnender war, je höher der Herbizidpreis war. In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass aus einer niedrigen Mitteleinsparung im Mais ein hoher finanzieller Gewinn entstehen kann, wenn die relativ teuren Maisherbizide teilschlagspezifisch appliziert werden. Obwohl die Mitteleinsparungen im Mais niedriger waren als im Getreide, konnte mehr Geld eingespart werden (vgl. Tab. 5.4). Insgesamt wurden in dieser Studie mit 8 €/ha bis 50 €/ha mehr Herbizidkosten eingespart als in der Studie von SCHWARZ und WARTENBERG (1999) mit 10 €/ha bis 15 €/ha.

Wichtig ist bei einer Anwendung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle, dass die finanziellen Vorteile langfristig bestehen bleiben. Es ist also von Bedeutung, dass in den unbehandelten Teilflächen, in denen die ökonomische Schadensschwelle unterschritten wurde und keine Unkrautbekämpfung erfolgte, in den Folgejahren keine neuen Unkrautnester, z.B. über die Samenproduktion der nicht bekämpften Unkräuter, entstehen. Dies wurde von NORRIS (1999) bei der dauerhaften Anwendung der ökonomischen Schadensschwelle vorhergesagt. NIEMANN (1986) sowie GEROWITT und HEITEFUSS (1990) haben dagegen in mehrjährigen Feldversuchen nachweisen können, dass die exakte Anwendung von Schadensschwellen bei der Unkrautkontrolle nicht zu einer Vermehrung der Unkräuter führt. Im vorliegenden Versuch war nicht nachzuweisen, dass sich Unkrautnester ausgeweitet haben, sich die Populationsdichte in den Nestern erhöht hat oder dass neue Unkrautnester entstanden sind. Deutlich wird das in Abbildung 5.6 am Beispiel der Ackerfuchsschwanzverteilung über vier Jahren. Zwar konnte das Ungrasnest trotz jährlichem Herbizideinsatz nicht beseitigt werden, es entstanden aber auch keine neuen Nester in den unbehandelten Bereichen.

Setzt man ein konstantes Einsparpotenzial voraus, kann daraus abgeleitet werden, wie hoch die Investitionskosten für die technische Umsetzung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle sein dürfen, um im Vergleich mit der ganzflächigen Applikation von Herbiziden kostenneutral arbeiten zu können. Aus den ermittelten Daten abgeleitet, stehen also im Durchschnitt über die Rotation  $33 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  zur technischen Umsetzung des Verfahrens zur Verfügung. Die Kosten für ein Verfahren, das eine automatische

Unkrautkartierung einschließt, liegen nach der Kalkulation von KIFFERLE (1999) mit 8,5 €/ha für die Unkrautkartierung und 3.550 €/a für die Applikationstechnik weit unter den im Versuch realisierten Einsparungen. Somit wäre das Verfahren ökonomisch sinnvoll. Da diese Berechnungen in weiten Teilen auf Schätzungen beruhen, kann dieser Kostenvorteil allerdings nur unter Vorbehalten angenommen werden. Abzuwarten bleibt, wie hoch die tatsächlichen Kosten insbesondere für den aufwendigen Prozess der Unkrautkartierung sein werden. Dass eine manuelle Unkrautkartierung in der Praxis keine Alternative zu einer automatischen Erkennung darstellt, ist offensichtlich, da die hohen Lohnkosten durch die Herbizideinsparungen bei weitem nicht gedeckt werden könnten (vgl. 6.1.1). Neben den hohen Kosten ist für dieses System auch die geringe Schlagkraft begrenzend.

Ebenfalls abzuwarten bleibt, inwieweit politische Rahmenbedingungen den Einsatz von Methoden zur Einsparung von Herbiziden unterstützen (vgl. Kap. 2.2.1). Eine stärkere Besteuerung von Herbiziden steigert den finanziellen Anreiz und erhöht den Spielraum zur Deckung der zusätzlich entstehenden Kosten, die mit der teilschlagspezifischen Herbizidausbringung verbunden sind, ebenso wie eine Prämie für Flächen, auf denen diese Technik angewendet wird (FALCONER und HODGE, 2000).

### **6.1.3 Ökologische Aspekte**

Eine ökologische Bewertung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle ist anhand der in den Versuchen ermittelten Daten nur teilweise möglich. Die Daten ermöglichen Aussagen über die eingesparte Herbizidmenge und die räumliche Verteilung der Flächen, auf denen im Versuchszeitraum Herbizide ausgebracht wurden. Aussagen über die Auswirkungen eines Herbizidverzichts auf Flora und Fauna können nicht getroffen werden, könnten jedoch Bestandteil von Folgeuntersuchungen sein.

Weniger Herbizide auf einem Feld auszubringen, ist zweifellos eine ökologische Leistung, weil damit die Gefahr der Kontamination von Grund- und Oberflächenwasser sowie der Belastung der Luft mit abdriftenden Herbiziden reduziert wird. Als Bewertungsmaßstab sind hier die in Kapitel 5.2.1 berechneten Einsparungen an Herbiziden zu betrachten. Demnach führte die teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung zu einer durchschnittlichen Herbizideinsparung von 65 %.

In den Versuchen wurde die Entscheidung zur Unkrautbekämpfung nur anhand der ökonomischen Schadensschwelle getroffen. Unberücksichtigt blieben die Kriterien wie

nahe eine Teilfläche an einem Oberflächengewässer lag, wie stark sie geneigt war oder wie hoch die Sorptionskraft des Bodens war. Diese Faktoren beeinflussen das Risiko für den Eintrag von Herbiziden in Gewässer (OLIVEIRA et al., 1999; VERMA et al., 1998) und sollten zur weiteren ökologischen Optimierung des teilschlagspezifischen Pflanzenschutzes mit berücksichtigt werden. Ebenso kann man mit dem hier beschriebenen Verfahren der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle gezielt Teilflächen bei der Herbizidapplikation aussparen, auf denen seltene Pflanzenarten auftreten.

Ein weiterer Parameter zur ökologischen Einschätzung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle ist die Beurteilung hinsichtlich der Auswirkungen auf die biologische Vielfalt in den Teilflächen, die selten mit Herbiziden behandelt werden. In den staatlich geförderten Ackerrandstreifenprogrammen, in denen die Randbereiche von Ackerflächen herbizidfrei gehalten werden, kann eine höhere Biodiversität und damit eine ökologische Aufwertung nachgewiesen werden (RASKIN et al., 1992).

Auch beim Einsatz der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle in der vorliegenden Studie wurden große Bereiche der Felder aufgrund der auch in einer Studie von WALTER (1996) ermittelten Ortsstabilität der Unkrautverteilung über mehrere Jahre nicht mit Herbiziden behandelt (vgl. Abb. 5.11).

Eine weitere intensivere Untersuchung der in unterschiedlicher Häufigkeit und Intensität mit Herbiziden behandelten Teilflächen mit den folgenden Schwerpunkten ist nötig, um Fragenstellungen zu klären, die sich im Zusammenhang mit der ökologischen Bewertung ergeben:

- Über eine genaue Vegetationsaufnahme sollten die Teilflächen hinsichtlich der Anzahl der Unkrautarten untersucht werden, um Unterschiede zwischen den in verschiedener Häufigkeit behandelten Feldsektoren nachzuweisen. Die in der vorliegenden Studie durchgeführte Bonitur eignete sich nicht für eine vegetationskundliche Analyse.
- Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen des Herbizidverzichts in den Teilflächen auf die Fauna können zu einer ökologischen Bewertung beitragen.
- Untersuchungen auf Pflanzenschutzmittelrückstände im Boden der verschiedenen Teilflächen.

## **6.2 Bewertung kleinräumiger Ertragsunterschiede und Konsequenzen für die Bewirtschaftung**

Die Ursachen der Ertragsunterschiede innerhalb der untersuchten Schläge des Dikopshofes ließen sich in zwei Kategorien einteilen. Neben natürlichen Inhomogenitäten konnten anthropogene Gründe für Inhomogenitäten identifiziert werden. Diese Einteilung konnte wie bei DOERGE (1999) anhand der Bereiche unterschiedlichen Ertragsniveaus gemacht werden. Zur Verifizierung dienten zusätzliche Karten und Informationen aus der Schlagkartei des Dikopshofes. Entsprechend der Ursachen für die Variabilität sind auch die Konsequenzen für die teilschlagspezifische Bewirtschaftung unterschiedlich anzupassen. Ziel ist in beiden Fällen, die Ertragspotenziale der Teilflächen optimal auszuschöpfen, ohne dabei Ressourcen zu verschwenden.

Die Basis für die Erfassung der Ertragsunterschiede bildeten die Daten, die mit dem Ertragssensor CERES 2 der Firma RDS<sup>®</sup> ermittelt wurden. Der Abgleich der auf dem Mähdrescher ermittelten Ertragshöhen mit den auf der Hofwaage gewogenen Erntemengen ergab für alle Stichproben zusammen sowie für Winterweizen und Wintergerste als einzelne Kulturen eine hohe Übereinstimmung. Bei den anderen Fruchtarten war der Stichprobenumfang zu niedrig, um Aussagen über die Zuverlässigkeit des Systems zu machen (vgl. Kap. 5.1.1).

Die guten Ergebnisse der Ertragserfassung mit dem RDS<sup>®</sup>-Ertragssensor im Vergleich mit Ertragssensoren anderer Hersteller sind im DLG-Merkblatt 303 (DLG, 1997) bestätigt worden.

### **6.2.1 Natürliche Ursachen**

Natürliche Ursachen für Ertragsunterschiede zwischen den Teilflächen lagen in der Studie auf den Feldern 7, 8 und 9 vor. Hier konnte, über den Vergleich der Karten von Boden und Relief mit den Ertragskarten, vor allem das wechselnde Wasserhaltevermögen der Böden und damit die Wasserversorgung der Kulturpflanze als entscheidende Größe identifiziert werden, die das Ertragspotenzial beeinflusste (vgl. Kap. 5.1.3).

FUNK und MAIDL (1997) sowie MAIDL et al. (1999) bestimmten bei Untersuchungen zu Ertragsunterschieden in Getreidebeständen ebenfalls Bodeneigenschaften als Auslöser für kleinräumige Ertragsschwankungen. Sie differenzierten dabei noch zwischen schweren und leichten Böden. Auf leichten Böden stellte demnach die nutzbare Feldkapazität den ertragsbegrenzenden Faktor dar. Auf schweren und teilweise auch mitt-

leren Böden war die Bodenstruktur, vor allem Verdichtungen in schluffigen Böden, ertragsbegrenzend.

Die Topographie eines Feldes war bei KRAVCHENKO und BULLOCK (2000) mit der Ertragshöhe korreliert. Hohe Erträge kamen demnach oft in Senken vor, niedrige in Feldsektoren mit einer Hangneigung. In trockenen Jahren kam es auf Kuppen zu stärkeren Ertragseinbußen durch Trockenstress als in den Senken, während in sehr feuchten Jahren in Senken Ertragsverluste durch Vernässung zu verzeichnen waren. Diese Ergebnisse deckten sich mit den Beobachtungen auf dem Dikopshof (vgl. Abb. 5.4, Abb. 5.5, Abb. 5.7), wobei auf Grund der kurzen Beobachtungsperiode über lediglich drei Jahre der Einfluss der Witterung nicht nachgewiesen werden konnte.

Die von LARK und STAFFORD (1998) angewendete Sequenzierung von Flächen in Teilflächen gleichen Ertrages mit Hilfe von Karten der Bodeneigenschaften lässt sich auch für die Flächen des Dikopshofes durchführen. Allerdings sollten für eine abschließende Bewertung der Teilflächen weitere Ertragskarten abgewartet werden, die den Einfluss unterschiedlicher Witterungsverhältnisse widerspiegeln.

Können eindeutig natürliche Ursachen für die Ertragsunterschiede gefunden werden und ist eine Einteilung der Fläche in Bereiche gleicher Ertragserwartungen möglich, sind daraus Empfehlungen für eine teilschlagspezifische Bewirtschaftung abzuleiten. Diese Empfehlungen können sich auf die Bodenbearbeitung, die Aussaatstärke, die Düngung sowie, beim Pflanzenschutz, auf die Höhe der Schadensschwelle beziehen.

Die Aussaatdichte kann an die Bodenverhältnisse und an die Exposition einer Teilfläche angepasst werden, um der Kulturpflanze beste Konkurrenzbedingungen zu verschaffen. Auf den schlechteren Böden ist es sinnvoll, die Aussaatstärke zu reduzieren, um die intraspezifische Konkurrenz der Kulturpflanze herabzusetzen. Im Mais erreichten BARNHISEL et al. (1996) mit einer herabgesetzten Aussaatmenge in flachgründigen Teilflächen eine Ertragssteigerung. Auf tiefgründigen Teilflächen war dagegen die hohe Aussaatstärke günstig. FIEZ und MILLER (1995) erzielten über eine Anpassung der Saatkichte an das Relief eine Ertragssteigerung in Winterweizen. Dichter wurde dabei auf Teilflächen mit einer nördlichen Exposition gesät. Dass eine teilflächenspezifisch variable Aussaatstärke auch ökonomisch vorteilhaft ist, wiesen BULLOCK et al. (1998) für Mais nach. Die zur Bestimmung der optimalen Aussaatmenge notwendigen Informationen über die wechselnde Bodeneigenschaften und die Topographie liegen für die untersuchten Flächen des Dikopshofes vor.

Für die untersuchten Schläge 7, 8 und 9 wäre als Konsequenz zu ziehen, dass die Aussaatdichte an den Teilflächen an Geländeübergängen und den leichten Böden auf

den Kuppen, die sich in den Ertragskarten durch niedrige Erträge auszeichneten, zu reduzieren sind, um das Ertragspotenzial optimal auszuschöpfen. Es sind dadurch keine Ertragseinbußen zu befürchten, sondern im Gegenteil teilweise auch Mehrerträge zu erwarten, weil die intraspezifische Konkurrenz herabgesetzt wird.

Bei der teilflächenspezifischen Düngung muss auf die, durch die unterschiedliche Ertragsniveaus bedingten, teilflächenspezifisch variablen Nährstoffentzüge reagiert werden, um eine Über- oder Unterversorgung des Bestandes zu vermeiden. Die Quantifizierung dieser Entzüge kann dabei über die Ertragskarten erfolgen, die im Versuchszeitraum erstellt wurden. Zu unterscheiden ist bei der Wahl der geeigneten teilschlagspezifischen Düngungsstrategie zwischen der Düngung von Phosphat und Kalium auf der einen Seite und Stickstoff auf der anderen Seite (PIERCE und NOWAK, 1999). Der Grund für diese Einteilung ist der Grad der zeitlichen Variabilität in der Verfügbarkeit der Pflanzennährstoffe im Vergleich zur räumlichen Variabilität. Während für P und K die temporäre Variabilität eine geringere Rolle spielt, ist sie für N oft stärker ausgeprägt als die Unterschiede im Raum.

Für P und K ist es daher möglich, auf Basis der über den Ertrag errechneten Nährstoffentzüge die Düngung teilschlagspezifisch zu planen (LÜTTICKEN et al., 1997). Unterstützend sind Bodenproben sinnvoll, wobei sich das Beprobungsmuster an die Verteilung der Managementzonen anlehnen sollte, die über den Abgleich der Ertragskarten mehrerer Jahre und der Bodenkarten zu bilden sind (BLACKMORE und LARSCHEID, 1997).

Bei der Stickstoffdüngung muss der Faktor der Variabilität im Zeitverlauf in den Entscheidungsprozess integriert werden. Dazu ist es nötig, den aktuellen Ernährungszustand der Kulturpflanzen während der Vegetationsperiode zu erfassen und daraus den Stickstoffbedarf abzuleiten. Bodenproben sind dafür nur bedingt geeignet, da sie mehrfach im Jahr zu ziehen wären. Sinnvoller ist es, entweder direkt an der Pflanze die Stickstoffversorgung zu messen oder indirekt über die Reflektion des Pflanzenbestandes auf den Versorgungszustand zu schließen (HEEGE und REUSCH, 1997) wie es mit dem Hydro-N-Sensor praktiziert wird. Auch beim Einsatz dieses Sensors ist die Kopplung der online erhobenen Werte mit zusätzlich vorliegenden Flächeninformationen hilfreich, da es durch Inhomogenitäten der Bodeneigenschaften und der Wasserversorgung innerhalb eines Ackerschlates zu Fehlinterpretationen der Sensorwerte kommen kann. So kann zum Beispiel die Information, dass an einer Stelle im Feld ein Kieskopf und damit Wasserstress vorliegt, der Fehldeutung einer Stickstoffunterversorgung vorbeugen.

Bei der Unkrautkontrolle ist die Höhe der ökonomischen Schadensschwelle abhängig von dem zu erwartenden monetären Mehrertrag durch eine Behandlungsmaßnahme. Entsprechend der Heterogenitäten in Ackerschlägen ist es möglich, teilschlagspezifische Werte für die Bekämpfungsschwelle festzulegen. Nach PALLUTT und FLATTER (1998) sinkt die Konkurrenzkraft von Unkräutern gegenüber den Kulturpflanzen auf schlechteren Böden. Das heißt, die Ertragseinbußen, die von einer Unkrautpflanze ausgehen, sind auf den Teilflächen mit einem niedrigen Ertragsniveau niedriger als dort, wo ein hoher Ertrag zu erwarten ist. Aus ökonomischer Sicht muss daher bei der teilflächenspezifischen Anpassung der Bekämpfungsschwelle auf ertragsschwächeren Teilflächen eines Feldes eine höhere Unkrautdichte toleriert werden. Bei den untersuchten Flächen des Dikopshofes trifft das vor allem für die Teilflächen zu, auf denen die Wasserversorgung limitierend für den Ertrag ist.

### **6.2.2 Anthropogene Ursachen**

Als anthropogene Ursachen für Ertragsunterschiede sollen hier Einflussgrößen gesehen werden, die durch die Bewirtschaftungsweise entstanden sind und die durch eine angepasste Bewirtschaftung wieder zu beseitigen sind. In der vorliegenden Studie konnten solche Ursachen auf den Schlägen 4 und 8 identifiziert werden.

Erkennbar sind durch unterschiedliche Felderfolgen hervorgerufene Ertragsunterschiede in Ertragskarten nach DOERGE (1999) durch geradlinige Abgrenzungen von Zonen unterschiedlichen Ertrages. Ähnlich können sich ein Sortenwechsel oder eine Änderung der Düngungs- oder Pflanzenschutzstrategie darstellen. Streifenförmige Veränderungen in Ertragskarten lassen auf Lücken oder Überlappungen bei Düngung oder Pflanzenschutz oder auf Fehler bei der Aussaat schließen.

Die auf Schlag 4 festgestellte geradlinige Unterteilung der Fläche in Zonen verschieden hohen Ertrages war auf eine zurückliegende Teilung des Feldes zurückzuführen. Die Teilflächen wurden vormals in verschiedenen Felderfolgen bewirtschaftet (vgl. Abb. 5.2). Die Auswirkungen der stark hackfruchtbetonten Felderfolge und insbesondere auch der zweimalig aufeinander folgende Anbau von Körnermais zeigte sich langfristig in vielfältiger Ausprägung. Die im Boden gemessenen Unterschiede bezüglich Humus-, Kalium- und Phosphatgehalt dürften die Auslöser der Ertragsunterschiede sein. Der hohe Humusgehalt hat seinen Ursprung in der hohen Zufuhr an Biomasse, der mit dem Körnermais anbau verbunden war. Damit verbunden sind auch positive Effekte auf die Bodenstruktur, Wasserhaltevermögen und die Sorptionskraft für Ionen (GEISLER, 1988).



Die in den Hohertragszonen aufgetretene höhere Unkrautdichte ist ebenfalls auf die unterschiedliche Feldhistorie zurückzuführen. In Abbildung 5.3 wird das an den Beispielen des Weißen-Gänsefußes (*Chenopodium album*) und des Feld-Ehrenpreises (*Veronica arvensis*) gezeigt. Während nach HANF (1990) und ANDREASEN et al. (1991) der Weiße-Gänsefuß als typisches Unkraut der Sommerungen in der Ausbreitung vom Anbau der Hackfrüchte profitierte, war für den Feld-Ehrenpreis der höhere Humusgehalt im Boden förderlich. Zu berücksichtigen ist auch die höhere Sorptionskraft für Herbizide im Boden durch den höheren Humusanteil in diesem Feldabschnitt. Die Wirksamkeit der ausgebrachten Bodenherbizide wird durch Sorption der Wirkstoffe an den Humusbestandteilen des Bodens beeinträchtigt (OLIVEIRA et al., 1999). Der zu erwartende Ertragsrückgang durch die hohe Unkrautkonkurrenz konnte jedoch nicht beobachtet werden, da er durch die besseren Bodenverhältnisse mehr als kompensiert wurde.

Auf Schlag 8 dagegen lag eine Zone niedrigen Ertrages an der gleichen Stelle wie ein Streifen, an dem Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) in hoher Dichte auftrat (vgl. Kap. 5.1.4). Es ist hier davon auszugehen, dass sich die hohe Ungrasdichte negativ auf den Ertrag auswirkte. Über den Ursprung dieses Unkrautnestes geben die Flächeninformationen keinen Aufschluss. Der Grund für die Stabilität könnte in dem unvollständigen Bekämpfungserfolg liegen. Kleine Ungrassamen überdauern in der Regel nicht lange im Boden. Der Samenvorrat im Boden konnte jedoch jedes Jahr erneuert werden.

Anders als bei den aufgrund natürlicher Variationen im Ackerschlägen entstehenden Ertragsunterschieden, sollte bei den anthropogen entstandenen Ertragsunterschieden darauf hingearbeitet werden, diese Unterschiede durch geeignete Maßnahmen auszugleichen.

Auf Schlag 4 ist die P- und K-Düngung den gemessenen Versorgungsstufen anzupassen. Langfristiges Ziel könnte hier auch sein, den Humusgehalt im Boden der südlichen Teilfläche anzuheben.

Auf Schlag 8 sollten gezielte und intensivierete Maßnahmen zur Beseitigung des Ungrasstreifens vorgenommen werden. Hier ist eine teilschlaggerechte Kopplung von chemischen, mechanischen und pflanzenbaulichen Methoden zur Unkrautkontrolle denkbar (KROHMANN und GERHARDS, 1999).

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle über vier Jahre in einer viergliedrigen Felderfolge bestehend aus Winterweizen, Wintergerste, Körnermais und Zuckerrübe durchgeführt.

Die aus der praktischen Umsetzung des Verfahrens gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse lassen die Bewertung der technischen Anforderungen, der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit der präzisen Unkrautkontrolle zu. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In Abhängigkeit von der Bekämpfungsschwelle und dem kulturspezifischen Unkrautauftreten waren die Potenziale Herbizide einzusparen in den verschiedenen Kulturen unterschiedlich hoch. Auf den Einsatz von Herbiziden gegen Ungräser konnte in allen Kulturen im größeren Umfang verzichtet werden als gegen dikotyle Unkräuter. Im Wintergetreide lagen die durchschnittlichen Einsparungen an Gräserherbiziden bei ca. 90 %, im Mais bei 78 % und in Zuckerrüben bei 36 %. Die Einsparungen an Herbiziden gegen dikotyle Unkräuter lagen im Wintergetreide bei 60 %, im Mais bei 11 % und in Zuckerrüben bei 41 %.
- Die monetären Einsparungen durch den verminderten Herbizideinsatz und die Reduzierung der Herbiziddosis variierten zwischen den Kulturen in Abhängigkeit vom Herbizidpreis und dem Einsparpotenzial. Am größten war die monetäre Ersparnis in Körnermais mit 42 €/ha. In Winterweizen konnten die Aufwendungen für Herbizide um 32 €/ha reduziert werden, in Wintergerste um 27 €/ha und in den Zuckerrüben um 20 €/ha.
- Der ökologische Nutzen der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle besteht zunächst in der Einsparung von Herbiziden. Durch die gezielte Applikation blieben große Flächenanteile, in denen die ökonomische Schadensschwelle nicht überschritten wurde, über mehrere Jahre herbizidfrei. Flora und Fauna können sich in solchen Bereichen ungestört entwickeln. Ökologisch wertvolle Bereiche in Feldern können gezielt vom Herbizideinsatz ausgenommen werden. Ebenso ist es möglich auf leichten Böden oder nahe an Gewässern auf Herbizide zu verzichten.
- Für die technische Umsetzung des Verfahrens der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle in der Praxis sind Entwicklungen im Bereich der automatischen Unkrauterkennung und bei der Applikationstechnik notwendige Voraussetzungen. Durch die automatische Unkrauterkennung, z.B. über Bildanalyse, kann auf die aufwendige manuelle Unkrautkartierung verzichtet werden. Bei der Applikationstechnik sind die Möglichkeiten zum Wirkstoffwechsel während der Fahrt und zur Dosisregulie-

rung Bedingung für die Ausnutzung des gesamten Einsparpotenzials an Herbiziden.

- Die Entwicklung von teilschlagspezifischen Entscheidungsalgorithmen, die zusätzlich zur heterogenen Unkrautverteilung auch Inhomogenitäten bezüglich der Bodeneigenschaften innerhalb von Ackerschlägen berücksichtigen, trägt zu einem effizienteren Herbizideinsatz bei.

Die Analyse der Gründe von schlaginternen Ertragsunterschieden wurde in der Arbeit mit dem Ziel durchgeführt, die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle in den präzisen Pflanzenbau einzuordnen. Das Verständnis für die Wechselwirkungen der teilschlagspezifisch wechselnden Wachstumsfaktoren ermöglicht einen gezielten Einsatz von Betriebsmitteln und damit eine ressourcenschonende Wirtschaftsweise. Folgende ertragsbegrenzende Faktoren konnten ermittelt werden:

- Bodenunterschiede, die einen wesentlichen Einfluss auf die Wasserversorgung der Kulturpflanzen hatten. Das Wasserangebot war vor allem auf Teilflächen mit leichten Böden ertragsbegrenzend.
- Die Topographie der Flächen hatte ebenfalls eine Wirkung auf die Wasserversorgung. Reliefeigenschaften und Bodengüte waren oft gekoppelt. An Geländeübergängen und Kuppen waren die Böden oft leichter und die Erträge niedriger als in den ebenen Teilflächen oder den Senken.
- Einen langfristig ertragswirksamen Einfluss auf die Versorgung mit Grundnährstoffen und den Humusgehalt hatte die Bewirtschaftungsgeschichte vormals geteilter Flächen. Felderfolgen mit unterschiedlichem Hackfruchtanteil konnten als Auslöser identifiziert werden.
- Unkräuter konnten in Teilschlägen, die bezüglich ihrer Bodeneigenschaften homogen waren, als Ursache für Ertragseinbußen identifiziert werden.

Die daraus abgeleiteten Konsequenzen für den präzisen Pflanzenbau zielen darauf hin, die Intensität der Bewirtschaftung dem teilschlagspezifisch wechselnden Ertragspotenzial anzupassen. Entsprechend der natürlichen und anthropogenen Ursachen für Ertragsunterschiede können folgende Strategien entwickelt werden:

- Liegen natürliche Ursachen für Ertragsunterschiede vor, ist der Einsatz der Betriebsmittel an das jeweilige Ertragspotenzial anzupassen. Im einzelnen bedeutet das, dass die Saatkichte auf ertragsschwachen Teilflächen geringer zu wählen ist, die Düngung sich an den jeweiligen Nährstoffentzügen zu orientieren hat und

Schadensschwellen für den Einsatz von Pestiziden an wechselnde Konkurrenzverhältnisse und zu erwartende monetäre Erträge der Teilflächen anzupassen sind.

- Haben die Ertragsunterschiede Ursachen, die auf die Bewirtschaftung zurückzuführen sind, ist beim teilflächenspezifischen wirtschaften darauf hinzuarbeiten, die Heterogenitäten im Ertrag zu beseitigen. Langfristig geplante Maßnahmen zur Aufdüngung mit Grundnährstoffen oder zur Beseitigung von Unkrautnestern in den betroffenen Teilflächen sind dazu geeignet.

## 8 Literaturverzeichnis

- AFYUNI, M.M., CASSEL, D.K. und ROBARGE, W.P. (1993) Effect of landscape position on soil water and corn silage yield. *Soil Science Society of America Journal* **57**, 1573-1580.
- AHRENS, W.H. (1994) Relative Costs of a weed-activated versus conventional sprayer in northern great-plains fallow. *Weed Technology* **8**, 50-57.
- ANDREASEN, C., STREIBIG, J.C. und HAAS, H. (1991) Soil properties affecting the distribution of 37 weed species in Danish fields. *Weed Research* **31**, 181-187.
- AUDENAERT, J. (2000) Applikationstechnik für Precision Farming in der Unkrautbekämpfung. *unveröffentlicht*.
- AUDENAERT, J. (2001) Verfahren der Applikationstechnik. In: KUNISCH M. (ed.) *KTBL-Fachtagung Precision-Farming im Pflanzenschutz*, 3.-4.5.2001, John Deere Schulungszentrum Bruchsal, 16-22.
- BARNHISEL, R.I., BITZER, M.J., GROVE, J.H. und SHEARER, S.A. (1996) Agronomic benefits of varying corn seed populations: a central Kentucky study. In: ROBERT, P.C., RUST, R.H., LARSON, W.E. (eds.) *Precision Agriculture. Proceedings of the 3rd International Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, 957-965.
- BEAUMONT, P. (1993) Pesticides, policies and people. London: The Pesticides Trust.
- BENNETT, A.L. und PANNELL, D.J. (1998) Economic evaluation of a weed-activated sprayer for herbicide application to patchy weed populations. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* **42**, 389-408.
- BILLER, R.H. (1998) Reduced input of herbicides by use of optoelectronic sensors. *Journal of Agricultural Engineering Research* **71**, 357-362.
- BILLER, R.H., HOLLSTEIN, A. und SOMMER, C. (1997) Precision application of herbicides by use of optoelectronic sensors. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '97, First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick University, UK, 451-458.
- BJERRE, K.D. (1999) Disease maps and site specific fungicide application in winter wheat. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '99, 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Odense, Denmark, 495-505.
- BLACK, I.D. und DYSON, C.B. (1993) An economic threshold model for spraying herbicides in cereals. *Weed Research* **33**, 279-290.
- BLACKMORE, B.S. und LARSCHIED, G. (1997) Strategies for managing variability. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '97, First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick University, UK, 851-859.
- BLACKMORE, S. (2000) The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture* **26**, 37-51.
- BLUMHORST, M.R., WEBER, J.B. und SWAIN, L.R. (1990) Efficacy of selected herbicides as influenced by soil properties. *Weed Technology* **4**, 279-283.

- BULLOCK, D.G., BULLOCK, D.S., NAFZIGER, E.D., DOERGE, T.A., PASZKIEWICZ, S.R., CARTER, P.R. und PETERSON, T.A. (1998) Does variable rate seeding of corn pay? *Agronomy Journal* **90**, 830-836.
- CARDINA, J., SPARROW, D.H. und MCCOY, E.L. (1995) Analysis of spatial distribution of common lambsquarters (*Chenopodium album*) in no-till soybean (*Glycine max.*). *Weed Science* **43**, 258-268.
- CARTER, A.D. (2000) Herbicide movement in soils: principles, pathways and processes. *Weed Research* **40**, 113-122.
- CHANCELLOR, R.J. (1985) Changes in the weed flora of an arable field cultivated for 20 years. *Journal of Applied Ecology* **22**, 491-501.
- CHANGERE, A. und LAL, R. (1997) Slope position and erosional effects on soil properties and corn production on a Miamian soil in Central Ohio. *Journal of Sustainable Agriculture* **11**, 5-21.
- CHAPRON, M., REQUENA-ESTESO, M., BOISSARD, P. und ASSEMAT, L. (1999) A method for recognizing vegetal species from multispectral images. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '99, 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Odense, Denmark, 239-247.
- CHRISTENSEN, S., HEISEL, T. und PAICE, M. (1999) Simulation of long term *Alopecurus myosuroides* population using three patch spraying strategies. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '99, 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Odense, Denmark, 977-987.
- CHRISTENSEN, S., HEISEL, T. und WALTER, A.M. (1996) Patch spraying in cereals. In: BROWN, H., CUSSANS, G.W., DEVINE, M.D., DUKE, S.O., FERNANDEZ QUINTANILLA, C., HELWEG, A., LABRADA, R.E., LANDES, M., KUDSK, P., STREIBIG, J.C. (eds.) *Proceedings of the second international weed control congress*, Copenhagen, Denmark, 963-968.
- CLAY, S.A., LEMS, G.J., CLAY, D.E., FORCELLA, F., ELLSBURY, M.M. und CARLSON, C.G. (1999) Sampling weed spatial variability on a fieldwide scale. *Weed Science* **47**, 674-681.
- COBLE, H.D. und MORTENSEN, D.A. (1992) The threshold concept and its application to weed science. *Weed Technology* **6**, 191-195.
- COLBACH, N., FORCELLA, F. und JOHNSON, G.A. (2000) Spatial and temporal stability of weed populations over five years. *Weed Science* **48**, 366-377.
- COLLIVER, C.T., MAXWELL, B.D., TYLER, D.A., ROBERTS, D.W. und LONG, D.S. (1996) Georeferencing wild oat (*Avena fatua*) infestations in small grains (wheat and barley): accuracy and efficiency of three weed survey techniques. In: ROBERT, P.C., RUST, R.H., LARSON, W.E. (eds.) *Precision Agriculture. Proceedings of the 3rd international conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, 453-463.
- COUSENS, R. (1985) A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology* **107**, 239-252.
- COUSENS, R. (1987) Theory and reality of weed control thresholds. *Plant Protection Quarterly* **2**, 13-20.

- DAMMER, K.H., SCHWEIGERT, T. und WITTMANN, C.H. (1999) Probability maps for risk assessment in a patchy weed control. *Precision Agriculture* **1**, 185-198.
- DANIELS, R.B., GILLIAM, J.W., CASSEL, D.K. und NELSON, L.A. (1987) Quantifying the effects of past soil erosion on present soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation* **42**, 183-187.
- DERKSEN, D.A., LAFOND, G.P., THOMAS, A.G., LOEPPKY, H.A. und SWANTON, C.J. (1993) Impact of agronomic practices on weed communities: tillage systems. *Weed Science* **41**, 409-417.
- DERKSEN, D.A., THOMAS, A.G., LAFOND, G.P., LOEPPKY, H.A. und SWANTON, C.J. (1995) Impact of postemergence herbicides on weed community diversity within conservation-tillage systems. *Weed Research* **35**, 311-320.
- DLG, (1997) Ertragsermittlung im Mähdrescher - Ertragsmessgeräte für die lokale Ertragsermittlung. Eine Ergänzung zu den DLG- Prüfberichten, DLG- Merkblatt 303, Frankfurt am Main.
- DOERGE, T.A. (1999) Yield Map Interpretation. *Journal of Production Agriculture* **12**, 54-61.
- EASTMAN, J.R. (1997) IDRISI for Windows, Version 2.0, User's guide. Worcester, MA, USA.
- EHLERT, D. (1994) Stand der Technik und Forschungsaufgaben zur kleinräumigen Bestandesführung. In: Technik für die kleinräumige Bestandesführung, *ATB/KTBL-Arbeitspapier* **214**, 50-57.
- EHLERT, D. (1999a) Measuring mass flow of potatoes for yield mapping. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '99, 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Odense, Denmark, 797-804.
- EHLERT, D. (1999b) Durchsatzermittlung zur Ertragskartierung im Feldhäcksler. *Agrartechnische Forschung* **5**, 1-7.
- EHLERT, D. (2000) Sensorik zur Gewinnung von Bodenparametern, Pflanzenparametern und Ertragsdaten. In: Elektronikeinsatz in der Landwirtschaft, *KTBL-Schrift* **390**, 59-66.
- EKSTRÖM, G. und BERNSON, V. (1995) Swedish pesticide policies 1972-93: risk reduction and environmental charges. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. **141**, 27-70.
- ESBJERG, P. (1998) Effects of reduced pesticide doses on flora and fauna of agricultural fields - a project linked to the Danish Pesticide Action Plan. *15th Danish Plant Protection Conference. Pests and Diseases, DJF-Rapport, Markbrug* **3**, 109-120.
- EVANS, K., WEBSTER, A., BARKER, A., HALFORD, P., RUSSEL, M., STAFFORD, J. und GRIFFIN, S. (1999) Mapping infestations of potato cyst nematodes and potential for patch treatment with nematicides. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '99, 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Odense, Denmark, 505-516.

- FALCONER, K.E. (1998) Managing diffuse environmental contamination from agricultural pesticides: an economic perspective on issues and policy options, with particular reference to Europe. *Agriculture Ecosystems & Environment* **69**, 37-54.
- FALCONER, K. und HODGE, I. (2000) Using economic incentives for pesticide usage reductions: responsiveness to input taxation and agricultural systems. *Agricultural Systems* **63**, 175-194.
- FELTON, W.L. und McCLOY, K.R. (1992) Spot spraying. *Agricultural Engineering* **73**, 9-12.
- FIEZ, T.E. und MILLER, B.C. (1995) Varying winter-wheat seeding rates among landscape positions. *Journal of Production Agriculture* **8**, 346-350.
- FIEZ, T.E., MILLER, B.C. und PAN, W.L. (1994) Winter wheat yield and grain protein across varied landscape positions. *Agronomy Journal* **86**, 1026-1032.
- FUNK, R. und MAIDL, F.X. (1997) Heterogenität der Ertragsbildung von Winterweizen auf Praxisschlägen des oberbayerischen Tertiärhügellandes im Hinblick auf eine teilschlagspezifische Bestandesführung. *Pflanzenbauwissenschaften* **1**, 117-126.
- GEISLER, G. (1988) Pflanzenbau: Ein Lehrbuch - Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion, 2. Auflage. Berlin, Hamburg: Verlag Paul Parey.
- GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., KNUF, D. und KÜHBAUCH, W. (1996a) Kartierung und geostatistische Analyse der Unkrautverteilung in Zuckerrübenschlägen als Grundlage für eine teilschlagspezifische Bekämpfung. *Journal of Agronomy and Crop Science* **176**, 259-266.
- GERHARDS, R., WYSE-PESTER, D.Y. und MORTENSEN, D.A. (1996) Characterizing spatial stability of weed populations using interpolares maps. *Weed Science* **45**, 108-119.
- GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., SCHULZE-LOHNE, K., MORTENSEN, D.A. und KÜHBAUCH, W. (1997) Site specific weed control in winter wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* **178**, 219-255.
- GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., TIMMERMANN, C., KROHMANN, P. und KÜHBAUCH, W. (2000) Precision weed control - more than just saving herbicides. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft* **17**, 179-186.
- GEROWITT, B. und HEITEFUSS, R. (1990) Weed economic thresholds in cereals in the Federal Republic of Germany. *Crop Protection* **9**, 323-331.
- GOPALAPILLAI, S., TIAN, L. und ZHENG, J. (1999) Evaluation of a flow control system for site-specific herbicide applications. *Transactions of the ASAE* **42**, 863-870.
- GREEN, H.M., VENCILL, W.K., KVIEN, C.K., BOYDELL, B.C. und POCKNEE, S. (1997) Precision management of spatially variable weeds. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '97, First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick University, UK, 983-989.
- GUSTAFSON, D.I. (1993) Use of soil property data and computer models to minimize agricultural impacts on water quality. In: ROBERT, P.C., RUST, R.H., LARSON, W.E. (eds.) *Proceedings of soil specific crop management: a workshop on research and development issues*, Minneapolis, MN, USA, 287-292.



- HALVORSON, G.A. und DOLL, E.C. (1991) Topographic effects on spring wheat yields and water use. *Soil Science Society of America Journal* **55**, 1680-1685.
- HANF, M. (1990) Farbatlas Feldflora - Wildkräuter und Unkräuter. Stuttgart: Ulmer.
- HÄUSLER, A., NORDMEYER, H. und NIEMANN, P. (1998) Voraussetzungen für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft* **16**, 249-256.
- HEEGE, H.J. und REUSCH, S. (1997) Zur teilflächenspezifischen Stickstoff-Kopfdüngung. *Landtechnik* **52**, 126-127.
- HEISEL, T., ANDREASEN, C. und ERSBOLL, A.K. (1996a) Annual weed distributions can be mapped with kriging. *Weed Research* **36**, 325-337.
- HEISEL, T., CHRISTENSEN, S. und WALTER, A.M. (1996b) Weed managing model for patch spraying in cereal. In: ROBERT, P.C., RUST, R.H., LARSON, W.E. (eds.) *Precision Agriculture. Proceedings of the 3rd International Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, 999-1007.
- HEISEL, T., CHRISTENSEN, S. und WALTER, A.M. (1997) Validation of weed patch spraying in spring barley - preliminary trial. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '97, First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick University, UK, 879-886.
- JANSMA, J.E., VAN KEULEN, H. und ZADOKS, J.C. (1993) Crop protection in the year 2000: A comparison of the current policies towards agrochemical usage in four West European countries. *Crop Protection* **12**, 483-489.
- JENSEN, A.M.M. (1998) Effects of use of reduced herbicide doses on weeds. A part of the project: effects of use of reduced pesticide doses on flora and fauna in the agricultural landscape. *15th Danish Plant Protection Conference. Pests and Diseases, DJF-Rapport, Markbrug* **3**, 121-129.
- JOHNSON, G.A., MORTENSEN, D.A. und GOTWAY, C.A. (1996) Spatial and temporal analysis of weed seedling populations using geostatistics. *Weed Science* **44**, 704-710.
- KIFFERLE, G. (1999) Herbicide mapping project. *Unveröffentlicht*.
- KRAVCHENKO, A.N. und BULLOCK, D.G. (2000) Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal* **92**, 75-83.
- KROHMANN, P. und GERHARDS, R. (1999) Kontrolle von Unkrautnestern auf Ackerflächen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften Band* **12**, 277-279.
- LAMB, D.W. und BROWN, R.B. (2001) Remote-sensing and mapping of weeds in crops. *Journal of Agricultural Engineering Research* **78**, 117-125.
- LAMB, D.W., WEEDON, M.M. und REW, L.J. (1999) Evaluating the accuracy of mapping weeds in seedling crops using airborne digital imaging: *Avena* spp. in seedling triticale. *Weed Research* **39**, 481-492.
- LARK, R.M., CATT, J.A. und STAFFORD, J.V. (1998) Towards the explanation of within-field variability of yield of winter barley: soil series differences. *Journal of Agricultural Science* **131**, 409-416.

- LARK, R.M. und STAFFORD, J.V. (1998) Information on within-field variability from sequences of yield maps: multivariate classification as a first step of interpretation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **50**, 277-281.
- LARK, R.M. und WHEELER, H.C. (2000) Understanding and using yield maps - an analytical tool for their interpretation. *Outlook on Agriculture* **29**, 39-45.
- LARSON, W.E., LAMB, J. A., KHAKURAL, B. R., FERGUSON, R. B., and REHM, G. W. 1997. Potential of site-specific management for nonpoint environmental protection. In: PIERCE, F.J., SADLER, E.J. (eds.) The state of site-specific management for agriculture. Madison, Wisconsin, ASA-CSSA-SSSA, 337-67.
- LETTNER, J., HANK, K. und WAGNER, P. (2001) Ökonomische Potenziale der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. *Berichte über Landwirtschaft* **Band 79**, 107-139.
- LINDQUIST, J.L., DIELEMAN, J.A., MORTENSEN, D.A., JOHNSON, G.A. und WYSE PESTER, D.Y. (1998) Economic importance of managing spatially heterogeneous weed populations. *Weed Technology* **12**, 7-13.
- LÜTTICKEN, R., KOCH, W. und BILL, R. (1997) The potential of yield maps and soil survey data in low cost site specific farming strategies. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '97, First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick University, UK, 803-810.
- LÜTTICKEN, R. (1999) Development of a precise dosage and documentation system for site specific application of base nutrients. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '99, 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Odense, Denmark, 837-845.
- MAIDL, F.X., BRUNNER, R., STICKSEL, E. und FISCHBECK, G. (1999) Ursachen kleinräumiger Ertragsschwankungen im bayerischen Tertiärhügelland und Folgerungen für eine teilschlagbezogene Düngung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **162**, 337-342.
- MARSHALL, E.J.P. (1988) Field-scale estimates of grass populations in arable land. *Weed Research* **28**, 191-198.
- MAXWELL, B.D. und COLLIVER, C.T. (1995) Expanding economic thresholds by including spatial and temporal weed dynamics. *Brighton crop protection conference: weeds*, Brighton, UK, 1069-1076.
- MEDLIN, C.R. und SHAW, D.R. (2000) Economic comparison of broadcast and site-specific herbicide applications in nontransgenic and glyphosate-tolerant *Glycine max.* *Weed Science* **48**, 653-661.
- MEDLIN, C.R., SHAW, D.R., GERARD, P.D. und LA MASTUS, F.E. (2000) Using remote sensing to detect weed infestations in *Glycine max.* *Weed Science* **48**, 393-398.
- MILLER, M.P., SINGER, M.J. und NIELSEN, D.R. (1988) Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Science Society of America Journal* **52**, 1133-1141.
- MILLER, P.C.H., STAFFORD, J.V., PAICE, M.E.R. und REW, L.J. (1995) The patch spraying of herbicides in arable crops. *Brighton crop protection conference: weeds*, Brighton, UK, 1077-1086.

- MITCHELL, K.M., PIKE, D.R. und MITASOVA, H. (1996) Using a Geographic Information System (Gis) for herbicide management. *Weed Technology* **10**, 856-864.
- MORTENSEN, D.A., JOHNSON, G.A. und YOUNG, L.J. (1993) Weed distribution in agricultural fields. In: ROBERT, P.C., RUST, R.H., LARSON, W.E. (eds.) *Proceedings of soil specific crop management: a workshop on research and development issues* Minneapolis, MN, USA, 113-124.
- MURPHY, D.P.L., OESTERGAARD, H. und SCHNUG, E. (1994) Lokales Ressourcen Management - Ergebnisse und Ausblick. in: Technik für die kleinräumige Bestandesführung, *ATB/KTBL-Arbeitspapier* **214**, 90-101.
- NIEMANN, P. (1986) Schadensschwellenprinzips bei der Unkrautbekämpfung auf einem landwirtschaftlichen Betrieb. *Proceedings, EWRS symposium on economic weed control*, 385-392
- NORDBO, E., CHRISTENSEN, S. und KRISTENSEN, K. (1994) Unkrautbewirtschaftung von Teilflächen. in: Technik für die kleinräumige Bestandesführung, *ATB/KTBL-Arbeitspapier* **214**, 101-115.
- NORDMEYER, H. und DUNKER, M. (1999) Variable weed densities and soil properties in a weed mapping concept for patchy weed control. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '99, 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Odense, Denmark, 453-462.
- NORDMEYER, H. und HÄUSLER, A. (2000) Erfahrungen zur teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung in einem Praxisbetrieb. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft* **17**, 195-205.
- NORDMEYER, H., HAUSLER, A. und NIEMANN, P. (1997) Patchy weed control as an approach in precision farming. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '97, First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick, UK, 307-314.
- NORDMEYER, H., HÄUSLER, A. und NIEMANN, P. (1996) Weed mapping as a tool for patchy weed control. In: BROWN, H., CUSSANS, G.W., DEVINE, M.D., DUKE, S.O., FERNANDEZ, Q.C., HELWEG, A., LABRADA, R.E., LANDES, M., KUDSK, P., STREIBIG, J.C. (eds.) *Proceedings of the second international weed control congress*, Copenhagen, Denmark, 119-124.
- NORRIS, R.F. (1999) Ecological implications of using thresholds for weed management. *Journal of Crop Production* **2**, 31-58.
- OLIVEIRA, R.S., KOSKINEN, W.C., FERREIRA, F.A., KHAKURAL, B.R., MULLA, D.J. und ROBERT, P.J. (1999) Spatial variability of imazethapyr sorption in soil. *Weed Science* **47**, 243-248.
- PAICE, M.E.R., MILLER, P.C.H. und DAY, W. (1996) Control requirements for spatially selective herbicide sprayers. *Computers and Electronics in Agriculture* **14**, 163-177.
- PALLUTT, B. (2000) Einfluss der Konkurrenzkraft von Getreidebeständen auf das Unkrautwachstum und den Getreideertrag. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft* **17**, 265-274.

- PALLUTT, B. und FLATTER, A. (1998) Variabilität der Konkurrenz von Unkräutern in Getreide und daraus resultierende Auswirkungen auf die Sicherheit von Schwellenwerten. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft* **16**, 333-344.
- PEREZ, A.J., LOPEZ, F., BENLLOCH, J.V. und CHRISTENSEN, S. (2000) Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. *Computers and Electronics in Agriculture* **25**, 197-212.
- PIERCE, F.J. und NOWAK, P. (1999) Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy* **67**, 1-85.
- RASKIN, R., GLÜCK, E. und PFLUG, W. (1992) Floren- und Faunenentwicklung auf herbizidfrei gehaltenen Agrarflächen. *Natur und Landschaft* **67**, 7-14.
- SCHRÖDER, D., HANEKLAUS, S. und SCHNUG, E. (1997) Information management in Precision Agriculture with LORIS. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '97, First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick University, UK, 821-826.
- SCHUMACHER, W. (1992) Zur Effizienz der Schutzmaßnahmen für Ackerbiozönosen - mit Empfehlungen zur Vereinheitlichung der bisherigen Schutzprogramme. *Internationales Symposium Flora und Fauna der Äcker und Weinberge*, 1992, Universität Bonn und Rheinisches Freilichtmuseum Kommern, 201-218.
- SCHWARZ, J. und WARTENBERG, G. (1999) Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Herbizidanwendung. *Landtechnik* **54**, 334-335.
- SÖKEFELD, M., GERHARDS, R., KNUF, D. und KÜHBAUCH, W. (1995) Einfluss der Bewirtschaftungsweise auf die Verteilung von Unkrautarten auf Ackerflächen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften Band 8*, 369-372.
- SÖKEFELD, M., GERHARDS, R. und KÜHBAUCH, W. (2000) Site-specific weed control - from weed recording to herbicide application. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft* **17**, 227-233.
- SPAHILLARI, M., HAMMER, K., GLADIS, T. und DIEDERICHSEN, A. (1999) Weeds as part of agrobiodiversity *Outlook on Agriculture* **28**, 227-232.
- STAFFORD, J.V. und MILLER, P.C.H. (1993) Spatially selective application of herbicide to cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture* **9**, 217-229; 17 ref.
- THORNTON, P.K., FAWCETT, R.H., DENT, J.B. und PERKINS, T.J. (1990) Spatial weed distribution and economic thresholds for weed control. *Crop Protection* **9**, 337-342.
- TIAN, L., REID, J.F. und HUMMEL, J.W. (1999) Development of a precision sprayer for site-specific weed management. *Transactions of the ASAE* **42**, 893-900.
- TIAN, L. und ZHENG, J. (2000) Dynamic deposition pattern simulation of modulated spraying. *Transactions of the ASAE* **43**, 5-11.
- VERMA, A.K., COOKE, R.A., HIRSCHI, M.C. und MITCHELL, J.K. (1998) GIS and GPS assisted variable rate application (VRA) of agri-chemicals. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* **2**, 17-22.

- VIERI, M. und SPUGNOLI, P. (1997) A high pressure injection system for precision application of pesticide. In: STAFFORD, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '97, First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick University, UK, 669-676.
- VRINDTS, E. und DE BAERDEMAEKER, J. (1997) Optical discrimination of crop, weed and soil for on-line weed detection. In: Stafford, J.V. (ed.) *Precision Agriculture '97, First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick University, UK, 537-544.
- WAGNER, P. (2000) Problems and potential economic impact of precision farming. In: Conese, C., Falchi, M. (eds.) *Proceedings of the 7th International Congress for Computer Technology in Agriculture*, Florence, Italy, 241-249.
- WARTENBERG, G. und DAMMER, K.H. (2000) Unkrautererkennung im Echtzeitbetrieb- Möglichkeiten und Probleme. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft 17*, 187-194.
- WALTER, A.M. (1996) Temporal and spatial stability of weeds. In: Brown, H., Cussans, G., Devine, M., Duke, S., Fernandez, Q.C., Helweg, A., Labrada, R., Landes, M., Kudsk, P., Streibig, J. (eds.) *Proceedings of the second international weed control congress*, Copenhagen, Denmark, 125-130.
- WILSON, B.J. und BRAIN, P. (1991) Long-term stability of distribution of *Alopecurus myosuroides* Huds. within cereal fields. *Weed Research* **31**, 367-373.
- ZHANG, N.Q., RUNQUIST, E., SCHROCK, M., HAVLIN, J., KLUITENBURG, G. und REDULLA, C. (1999) Making GIS a versatile analytical tool for research in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture* **22**, 221-231.

## **Danksagung**

Herrn PD Dr. R. Gerhards danke ich für die Überlassung des Themas, die wissenschaftliche Betreuung und die hilfreichen Anregungen beim Abfassen dieser Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr. H. Goldbach bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats.

Dank gilt Herrn Prof. Dr. W. Kühbauch dafür, dass mir die Möglichkeit gegeben wurde, die wissenschaftlichen Arbeiten am Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau durchzuführen.

Den Angestellten des Versuchsgutes Dikopshof möchte ich für die tatkräftige Unterstützung bei den Feldversuchen danken. Insbesondere danke ich Herrn Beckers für die Hilfe bei allen auftretenden technischen Problemen mit der Pflanzenschutzspritze und die Installation des Ertragssensors.

Ebenso gilt mein Dank Herrn S. Reichart für die Bereitstellung und stetige Erweiterung der Software zur Erstellung der Unkrautkarten und Spritzensteuerung.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau danke ich für die gute Zusammenarbeit und den fruchtbaren Austausch im wissenschaftlichen Gespräch. Besonders hervorheben möchte ich dabei die Herren Dr. M. Sökefeld und P. Krohmann aus der Arbeitsgruppe Unkrautbiologie. Für die Arbeiten im Labor bedanke ich mich bei Frau S. Damm und Frau V. Förterer. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinen studentischen Hilfskräften, die mich bei den Felderhebungen unterstützt haben.

Gefördert wurde die vorliegende Arbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Für die finanzielle Unterstützung bedanke ich mich.